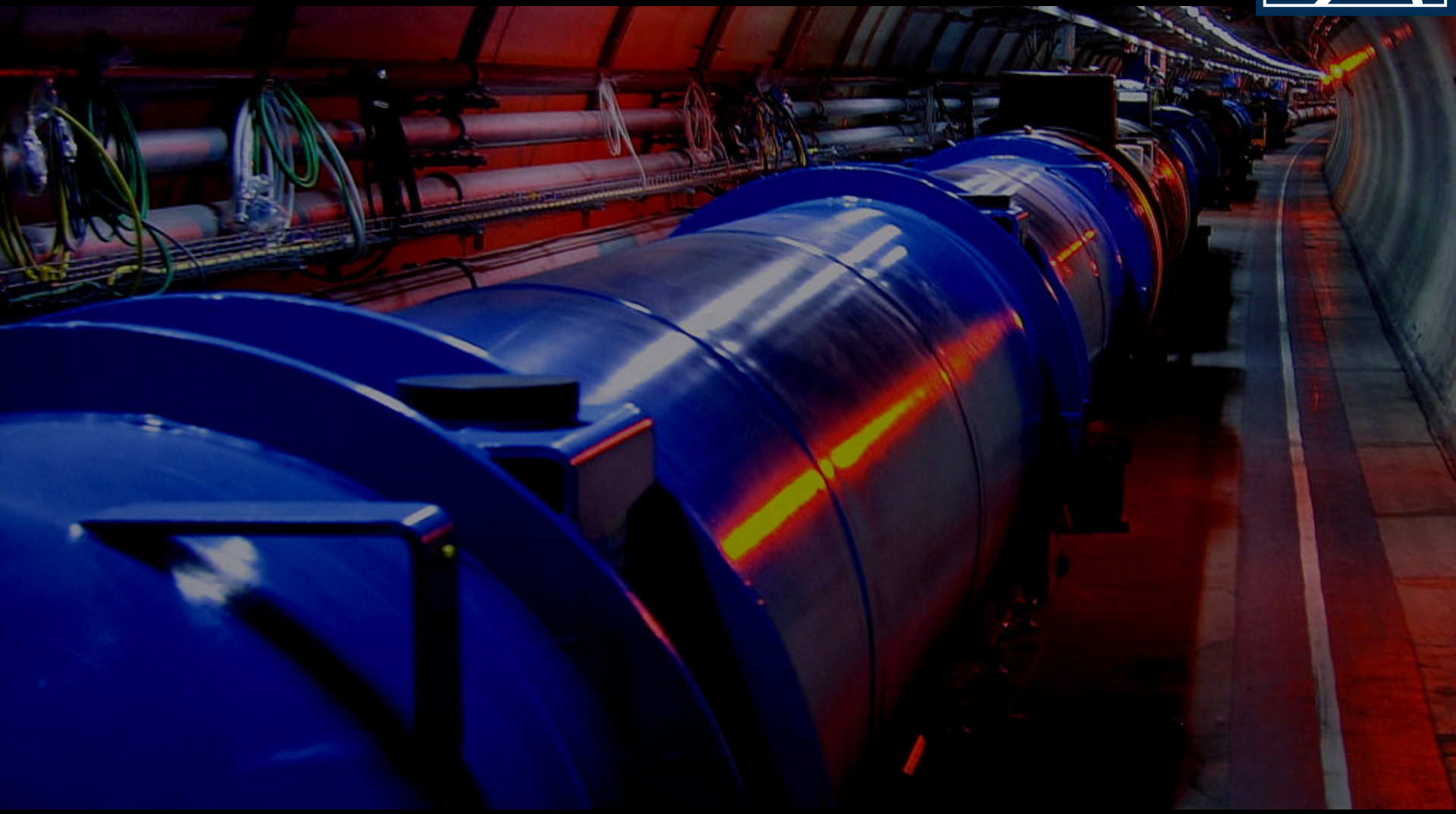
Jak działa i jak budowano LHC

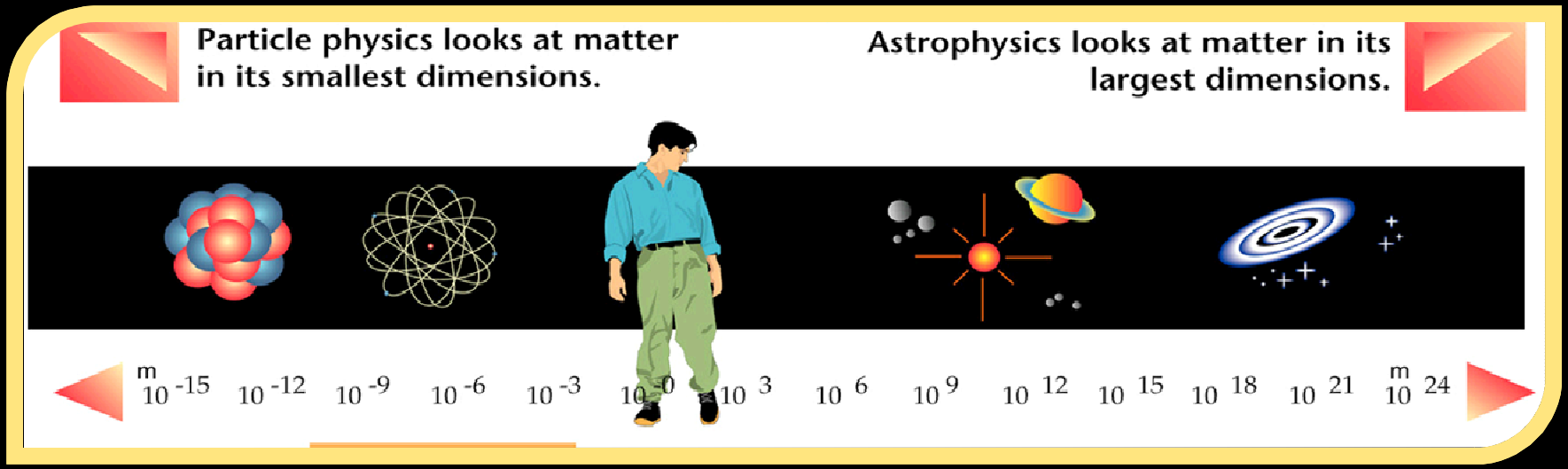


Andrzej SIEMKO
CERN, Departament Technologii Akceleratorów

Plan wykładu

- Wstęp
- Czym jest Wielki Zderzacz Hadronów LHC
- Wybrane wyzwania LHC
  - Nadprzewodnictwo w LHC i urządzenia nadprzewodnikowe
  - Kriogenika LHC
- Czy zawsze jest tak jakbyśmy tego chcieli?
- Pierwsze osiągnięcia
- Podsumowanie

Dwa bieguny w badaniu struktury materii



Akceleratory | Mikroskopy | Lunety | Optyczne i radioteleskopy

Współczesne akceleratory wraz z detektorami cząstek można uznać za bardzo czułe mikroskopy, lub poprawniej atto-skopy!

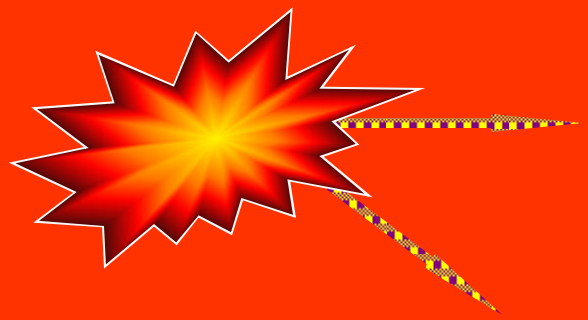
$\lambda = h/p$; @LHC: $T = 1$ TeV $\Rightarrow \lambda \cong 10^{-18}$ m

Jak poznać lepiej strukturę materii?

Dwie drogi do lepszego poznania fundamentalnej struktury materii

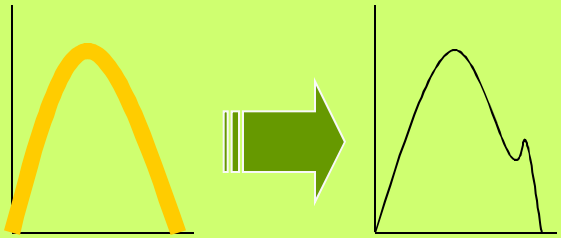
Wzrost energii

Nowe zjawiska (nowa fizyka) są spodziewane gdy "użyteczna" energia > mc^2 [×2]



Wzrost precyzji

Znane zjawiska badane z większa precyzja *mogą* pokazać niezgodności z istniejącymi teoriami



Czym jest Wielki Zderzacz Hadronów LHC?

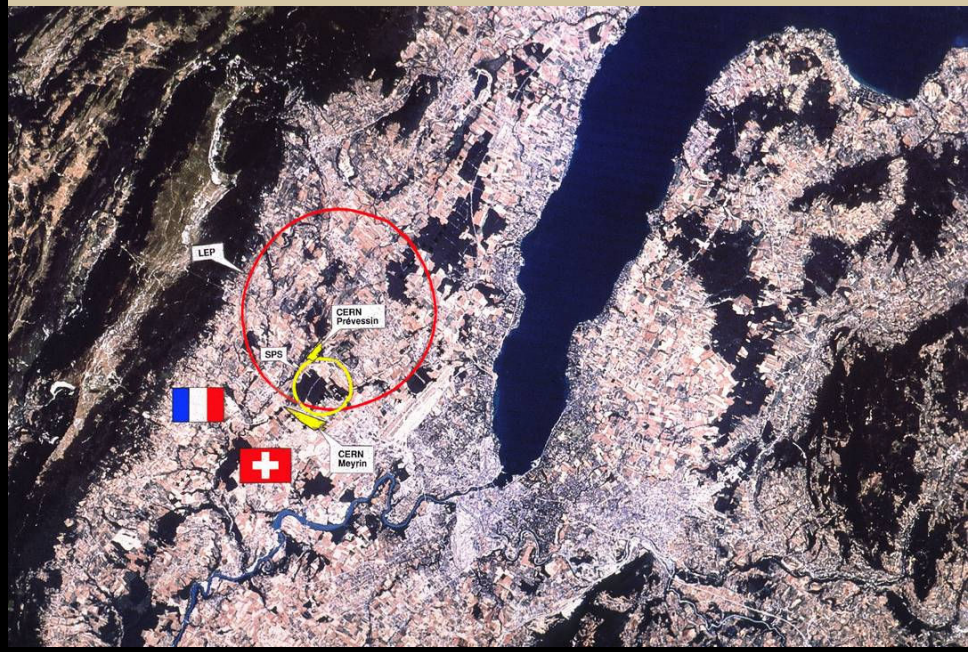
Akcelerator zderzający protony o energii 7 TeV

Najważniejsze daty Projektu LHC:

1982 : Pierwsze idee i opracowania
1994 : Zatwierdzenie projektu LHC przez Rade CERN
1996 : Decyzja o rozpoczęciu budowy
2004 : Początek instalacji LHC
2006 : Początek uruchamiania systemów technicznych
2008 : Początek pracy akceleratora z wiązkami protonów
2008 : Niespodziewana awaria
2009 : Ponowne uruchomienie – pierwsze zderzenia
…
2009-2030: planowana praca i eksperymenty fizyczne

Największe i najbardziej złożone urządzenie ("maszyna")

jakie kiedykolwiek został zbudowane



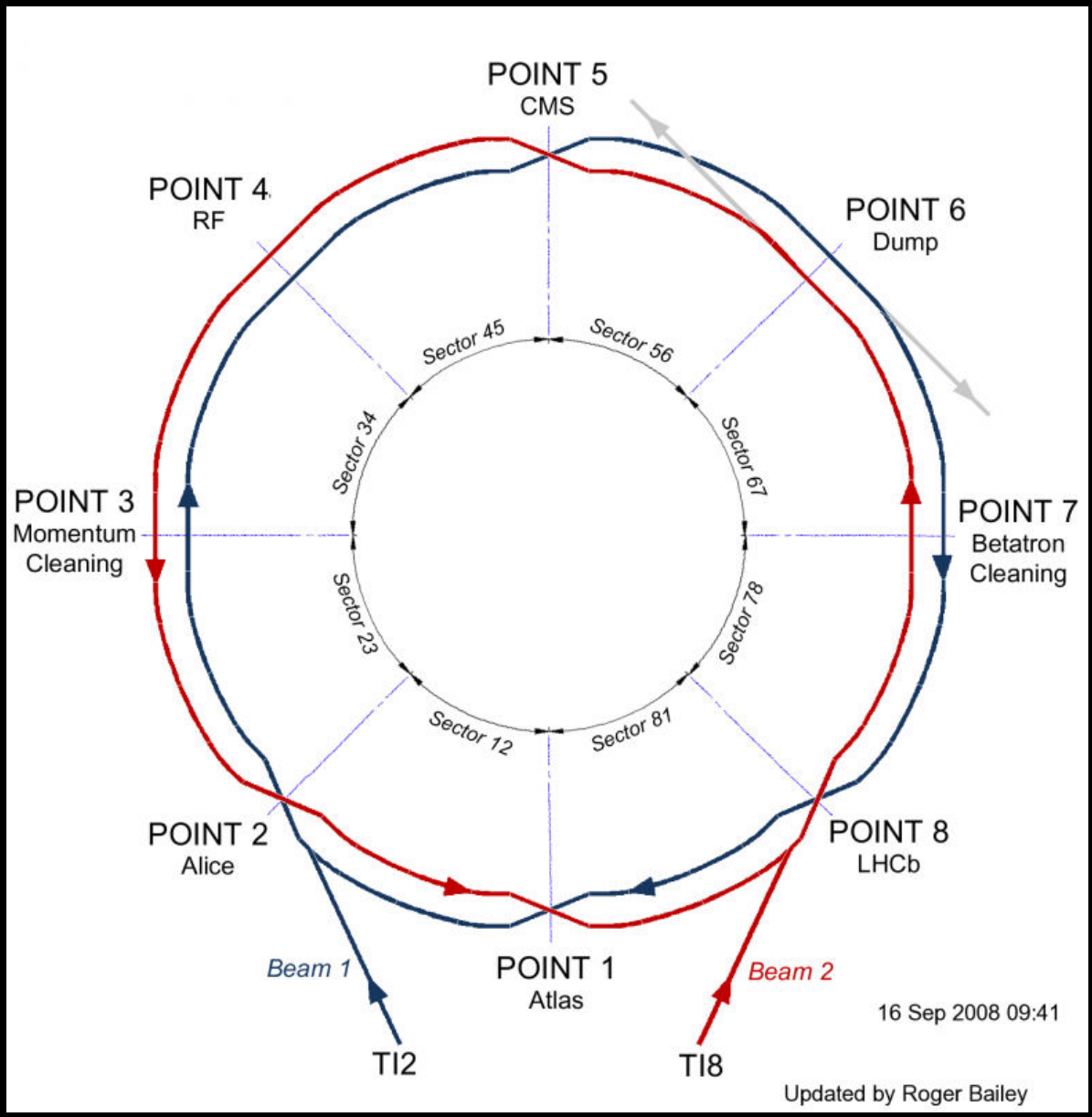
Główne parametry LHC

- Energia nominalna 7 TeV
- Energia początkowa (injection) 450 GeV
- Obwód pierścienia 26658.883 m
- Średnica pierścienia ~8.6 km
- Nominalne pole dipolowe 8.33 Tesla

- Pierścień podzielony jest na 8 niezależnych sektorów (kriogenika, zasilanie)
- Sektor składa sie z 23 komórek ca. 105m

Główne parametry LHC

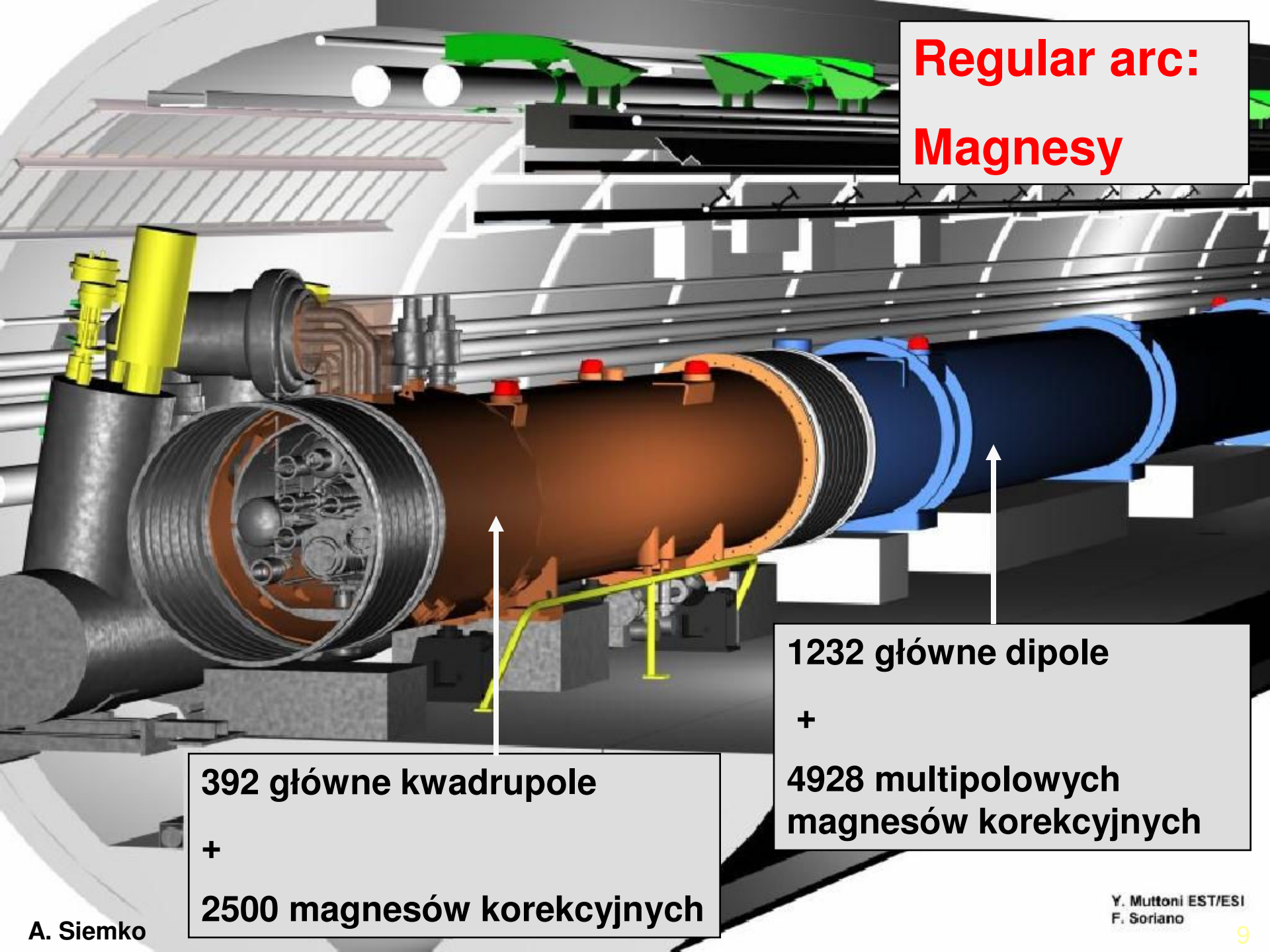
- LHC jest podwójnym synchrotronem o ośmiokrotnej symetrii:
  - 8 sektorów
    - 8 łuków (ca. 2500m)
    - 8 sekcji prostych (ca. 600m)
  - Dwie przeciwbieżne wiazki
  - 4 punkty przecięcia wiązek

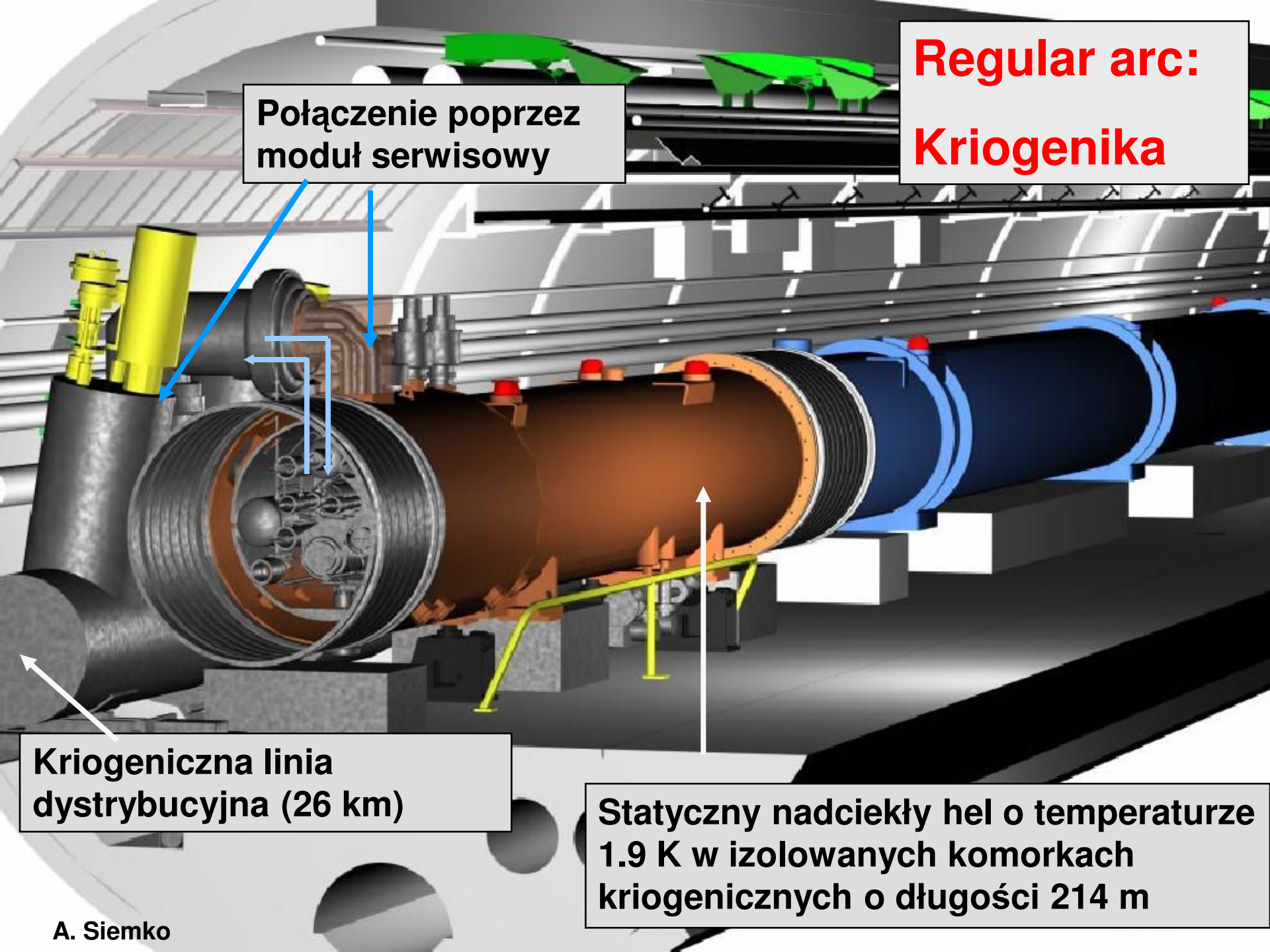


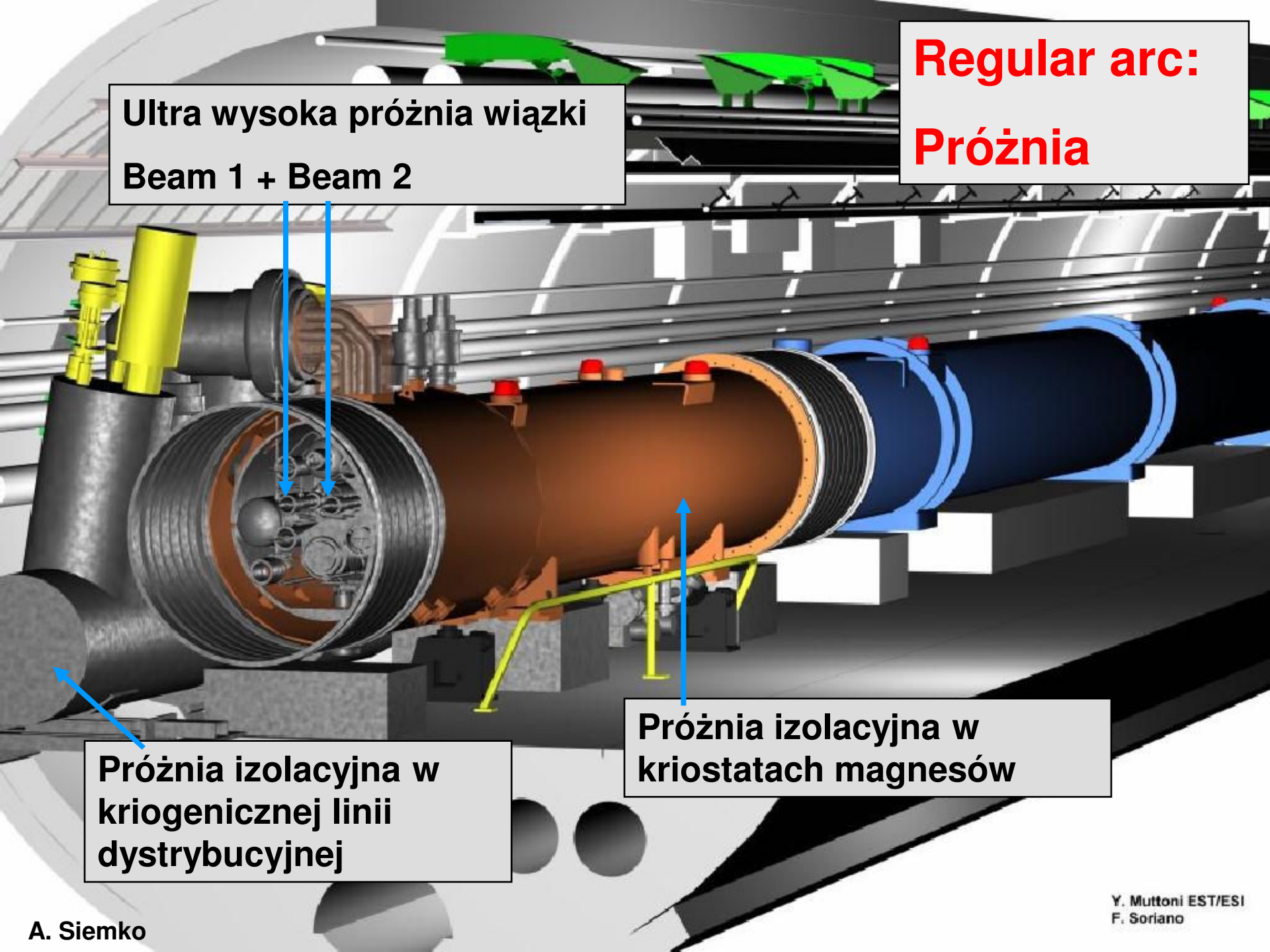
LHC – Wyzwania

- LHC – pierwszy akcelerator z magnesami nadprzewodnikowymi chłodzonymi nadpłynnym helem o temperaturze T=1.9 K:

  - **Nowe materiały,**
  - **Nowe technologie produkcji,**
  - **Nowe systemy detekcji i zabezpieczenia,**
  - **Niezawodność.**

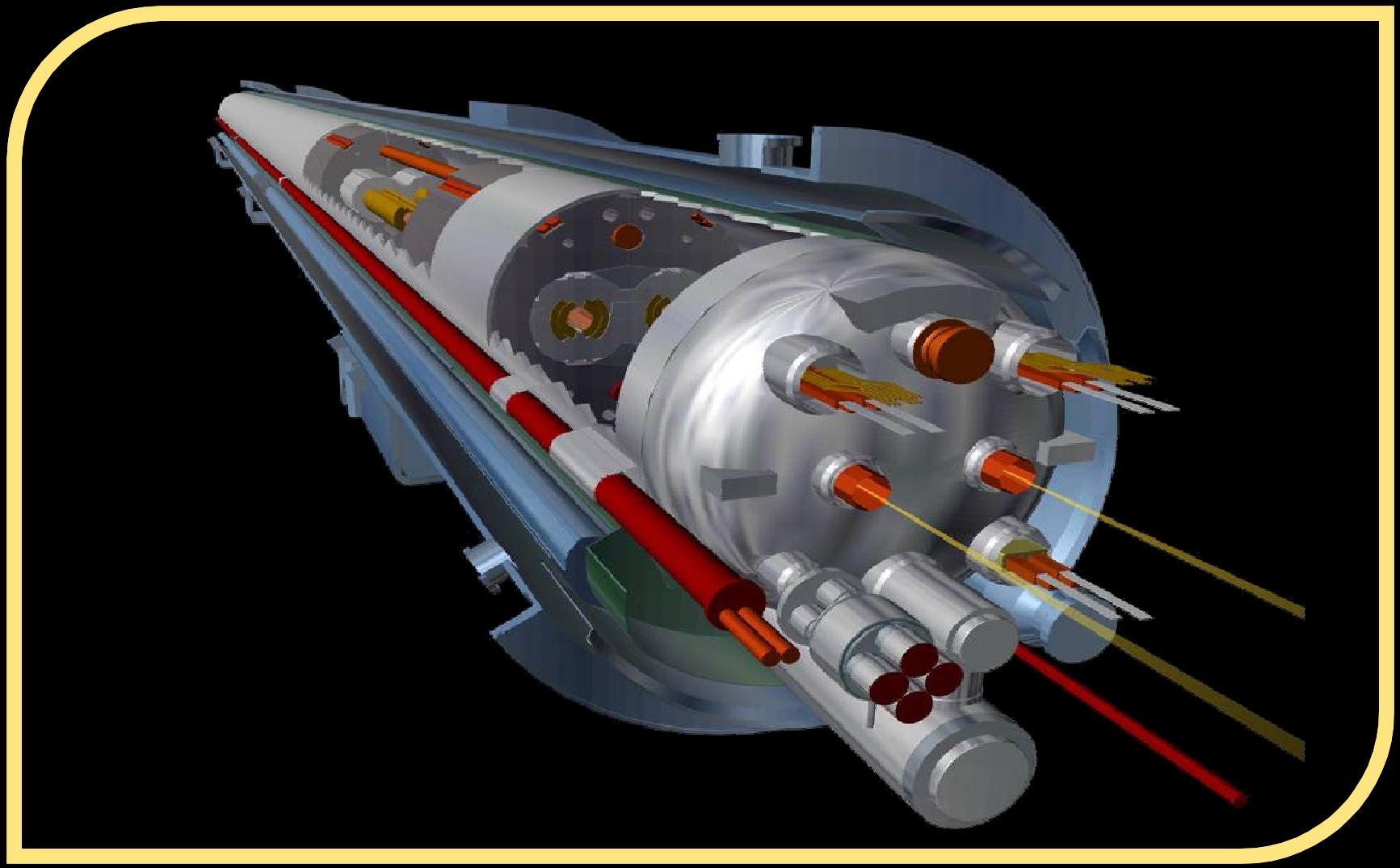

Regular arc:
Magnesy
1232 główne dipole
+
4928 multipolowych magnesów korekcyjnych
392 główne kwadrupole
+
2500 magnesów korekcyjnych


Regular arc:
Kriogenika
Połączenie poprzez moduł serwisowy
Kriogeniczna linia dystrybucyjna (26 km)
Statyczny nadciekły hel o temperaturze 1.9 K w izolowanych komorkach kriogenicznych o długości 214 m


Regular arc:
Próżnia
Ultra wysoka próżnia wiązki
Beam 1 + Beam 2
Próżnia izolacyjna w kriogenicznej linii dystrybucyjnej
Próżnia izolacyjna w kriostatach magnesów
Y. Muttoni EST/ESI
F. Soriano

A. Siemko

Magnesy nadprzewodnikowe LHC



Parametry glownych magnesów dipolowych LHC

Liczba głównych dipoli	1232
Pole dipolowe dla 7 TeV	8.33 T
Prąd w dipolach dla 7 TeV	11850 A
Energia zmagazynowana w dipolach	10 GJ
Liczba dipolowych obwodów elektrycznych	8
Całkowita liczba magnesów	~9600
Liczba wszystkich obwodów elektrycznych	1766

Nadprzewodnictwo

- Nadprzewodnictwo jest cechą wielu pierwiastków i materiałów polegającą na tym, że w pewnych warunkach maja one zerową rezystancję
- Poprawne określenie nadprzewodnictwa wymaga spełnienia jednocześnie dwóch warunków:
  - zaniku oporu elektrycznego
  - doskonałego diamagnetyzmu materiałów nadprzewodzących, zwanego efektem Meissnera

Odkrycie nadprzewodnictwa

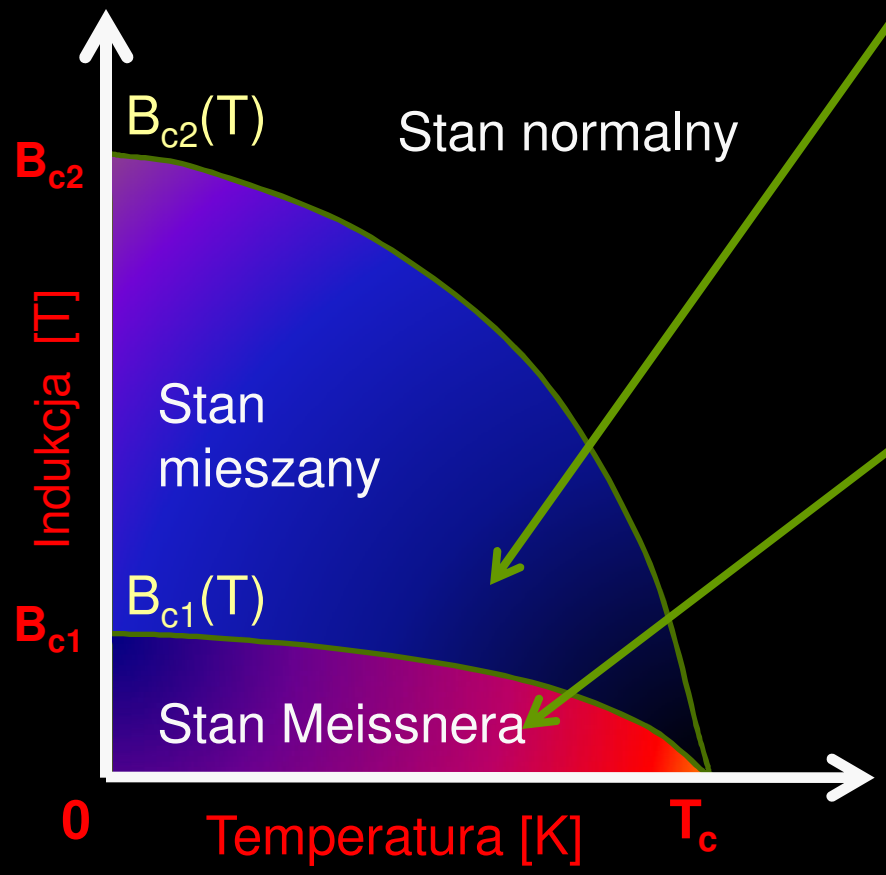
- 1908 – Kamerlingh Onnes skrapla hel

- 1911 – Pomiar zależności R-T dla rtęci

Metal	TC [K]	TC [°C]
Nb	9.3	-263.85
Pb	7.2	-265.954
V	5.4	-267.75
La	4.9	-268.25
Ta	4.5	-268.65
Hg	4.2	-268.95
Sn	3.7	-269.45
In	3.4	-269.75
Pd	3.3	-269.85
Cr	3.0	-270.15
Tl	2.4	-270.77
Al	1.2	-271.95
Zn	0.9	-272.3
Ti	0.4	-272.75
Rh	0.000325	-273.15

Podstawową właściwością stanu nadprzewodzącego jest to, że prąd elektryczny może płynąć bez występowania różnicy potencjałów

Nadprzewodniki I i II rodzaju

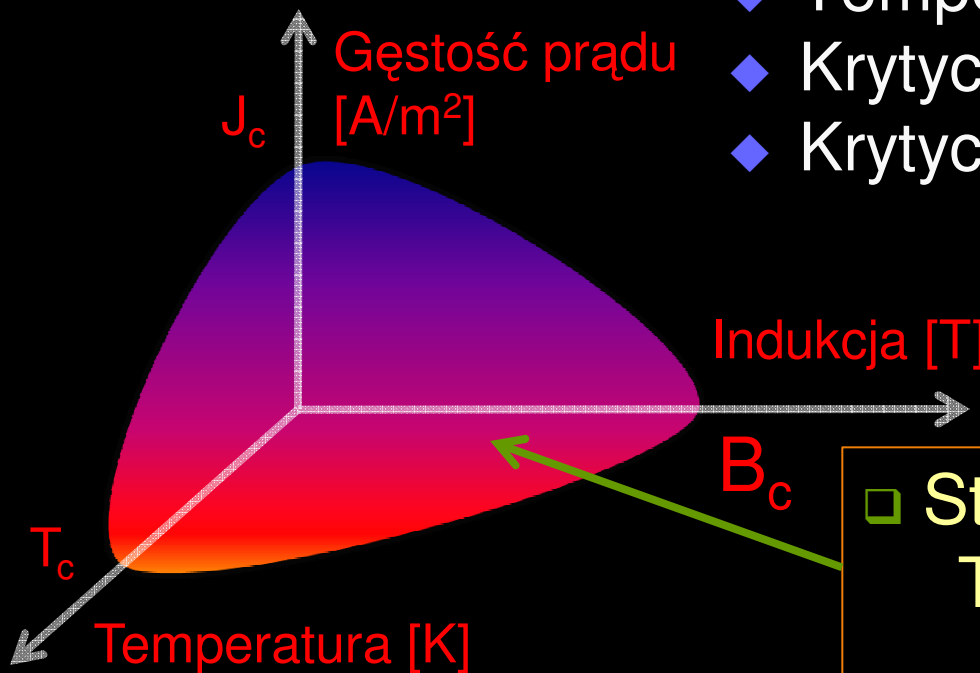


- Stan nadprzewodzący drugiego rodzaju (stan mieszany)
  - $\rho = 0$
  - $B \neq 0$

- Stan nadprzewodzący pierwszego rodzaju (stan Meissnera)
  - $\rho = 0$
  - $B = 0$

Diagram fazowy - powierzchnia krytyczna

- Temperatura krytyczna T_c
- Krytyczna gęstość prądu J_c
- Krytyczne pole magnetyczne B_c

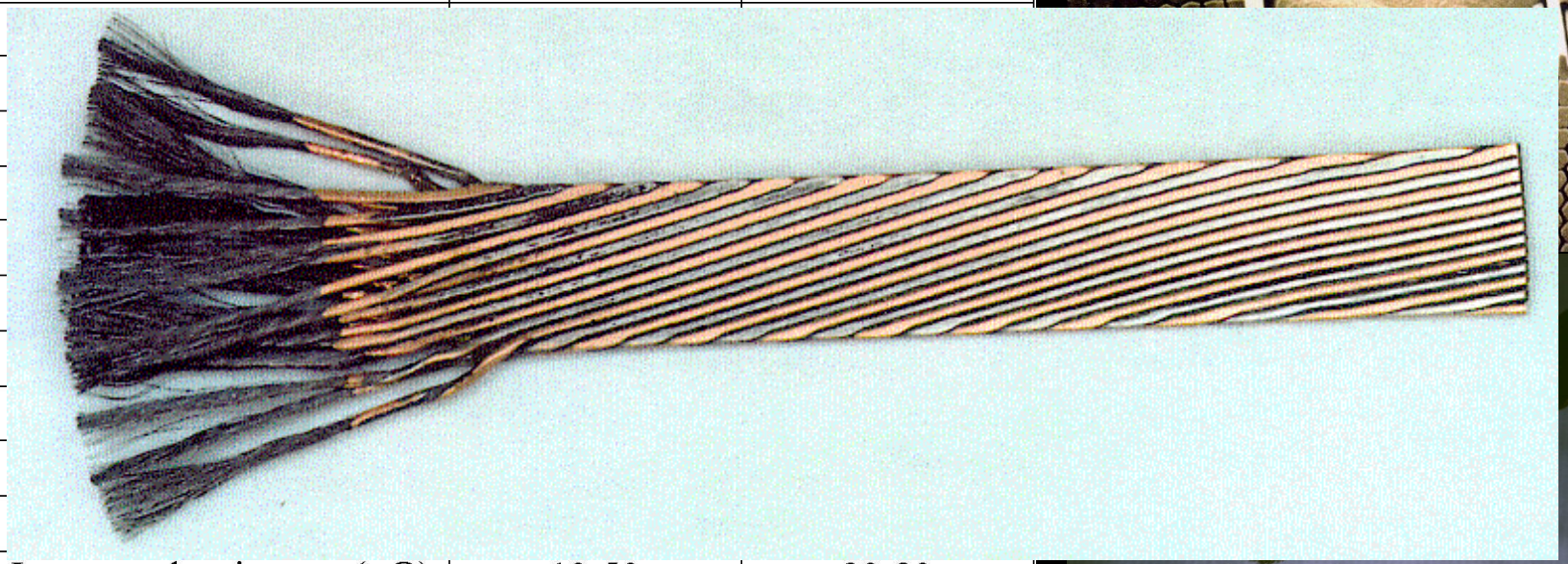


- Stan nadprzewodzący:
  $T < T_c$, $J < J_c$, $B < B_c$

- LHC wykorzystuje:
- Klasyczne nadprzewodniki niskotemperaturowe – stop Nb-Ti
- Wysokotemperaturowe nadprzewodniki typu BSCO – Bi-2223

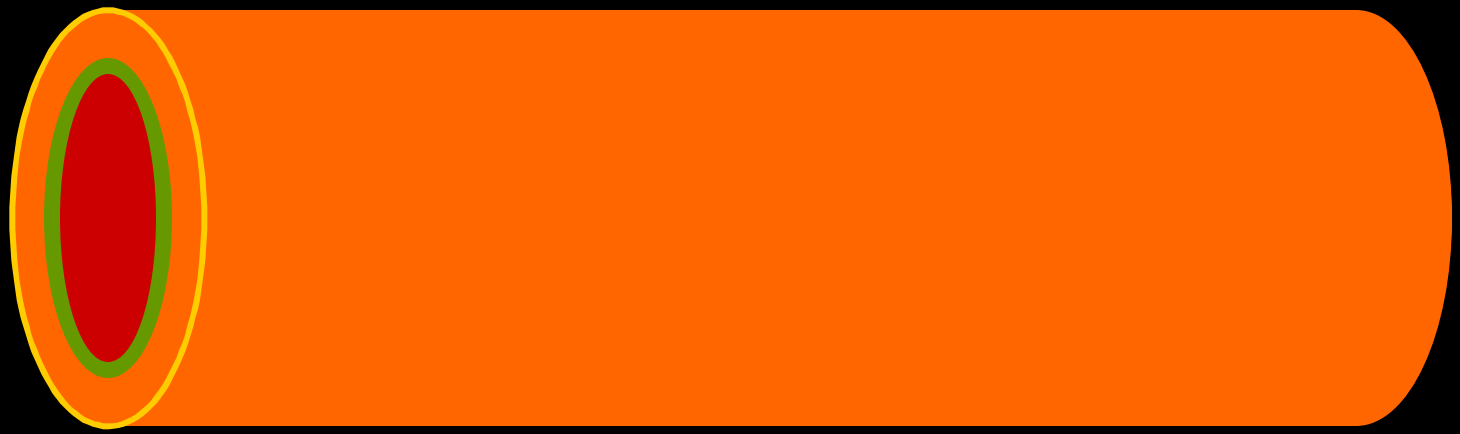
Nadprzewodniki LHC - 7000 km kabli Cu/Nb-Ti

STRAND	Type 01	Type 02
Diameter (mm)	1.065	0.825
Cu/NbTi ratio	1.6-1.7 ± 0.03	1.9-2.0 ± 0.03
Interstrand resistance (μΩ)	10-50	20-80



Produkcja nadprzewodników typu Nb-Ti

~ 1 m



Ø~ 20 cm

Nb-Ti Folia Nb Cylinder z Cu

⇓

Uszczelnienie i odpompowanie ⇒ Ekstruzja i ciągnienie

~ 10 m

Ø~ 7cm

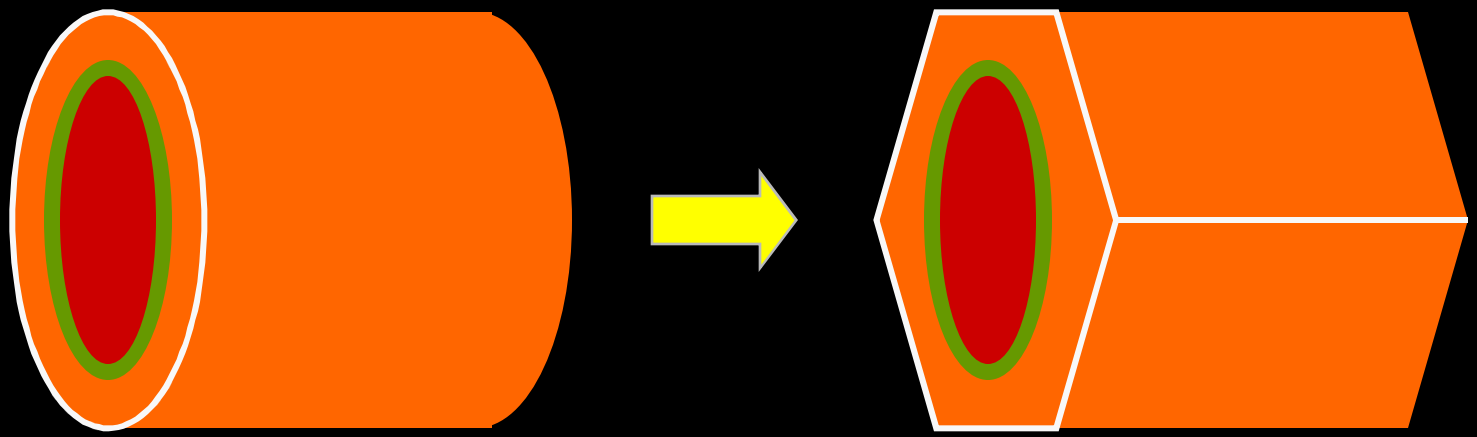
Produkcja nadprzewodników typu Nb-Ti

Dalsze wielokrotne ciągnienie połączone z obróbką cieplną

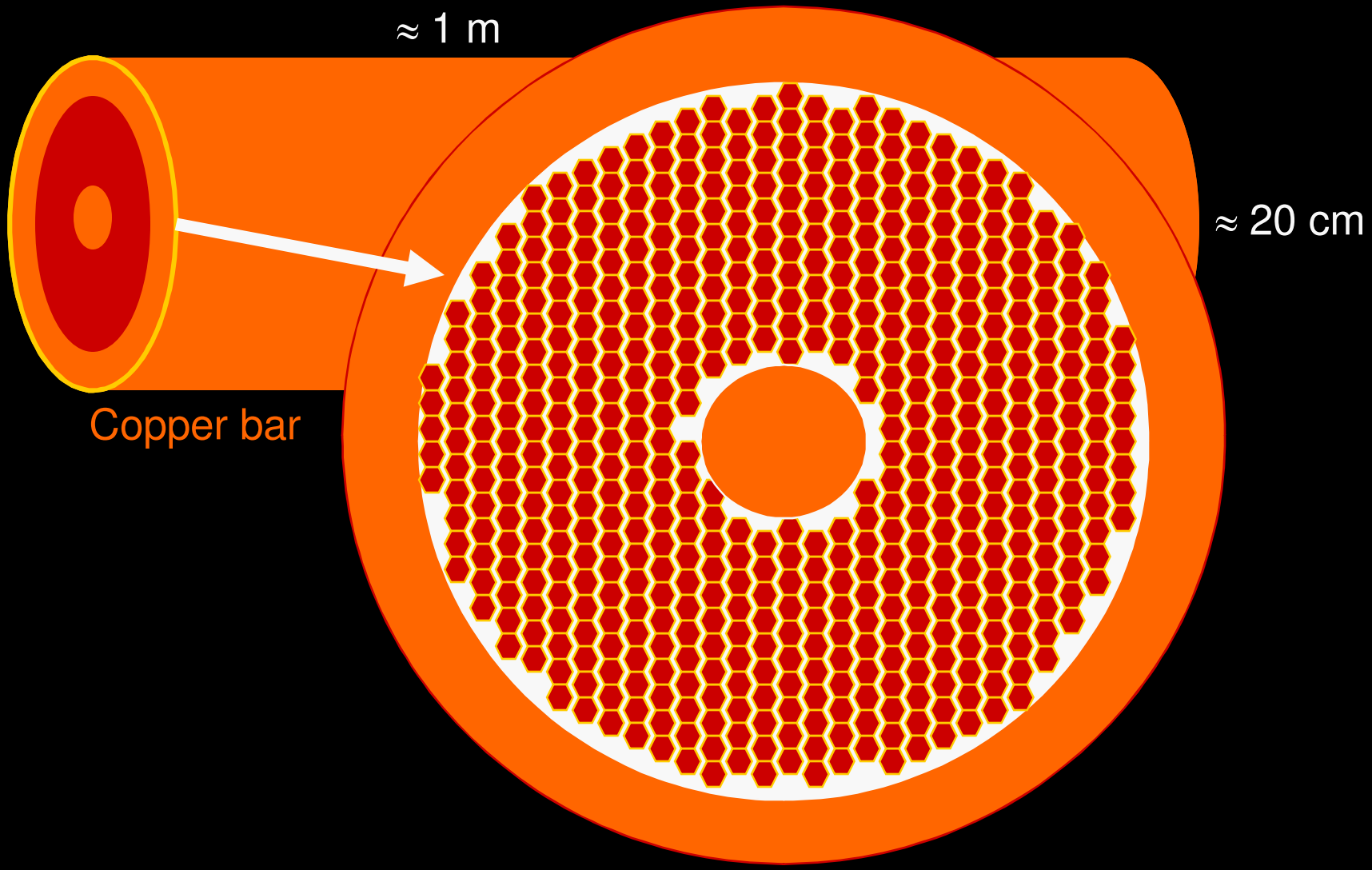
Redukcja średnicy od Ø 7 cm to Ø 1-5 mm

⇓

Ostateczne ciągnienie połączone z formowaniem kształtu sześciokątnego i ciecie na odcinki ~ 1 m



Produkcja nadprzewodników typu Nb-Ti



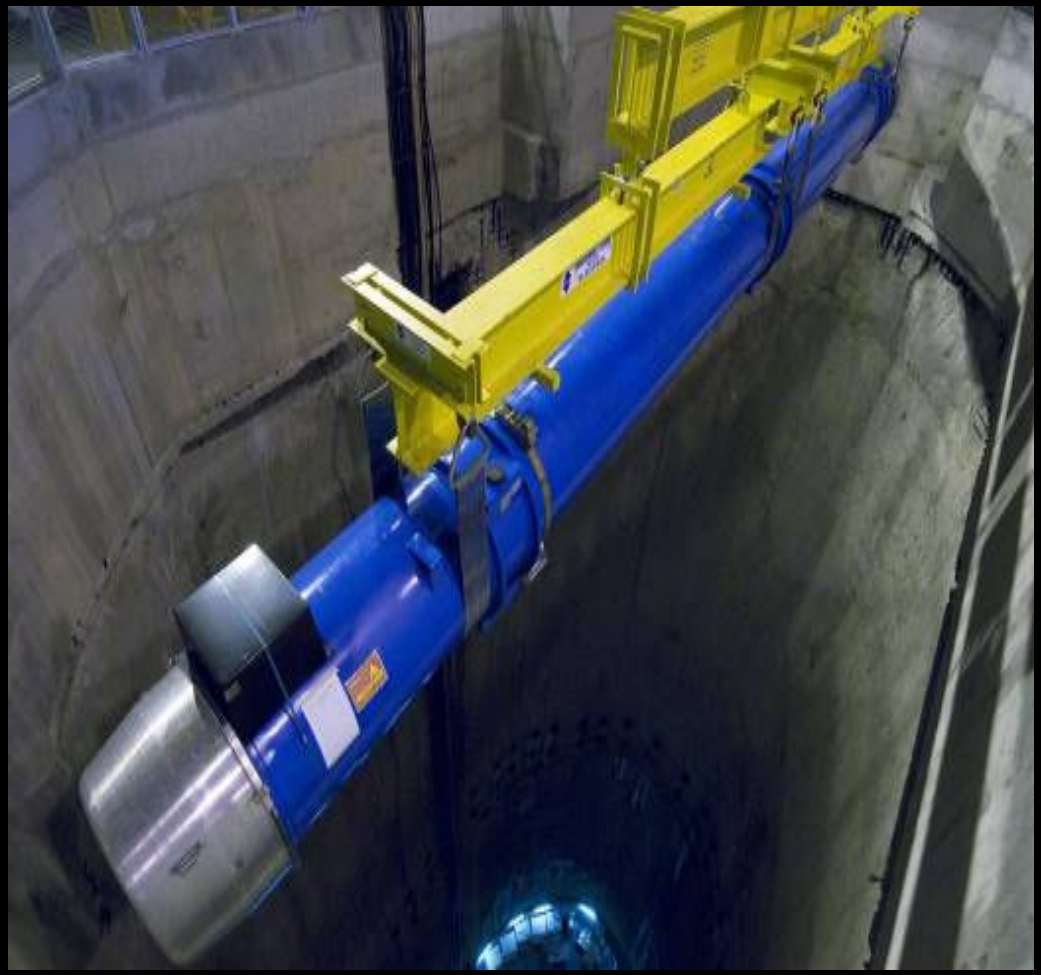
Produkcja w przemyśle: montaż cewek nadprzewodnikowych

Produkcja w przemyśle

Montaż finalny magnesów w kriostatach

Testy w stacji testów

Podroż 100m pod ziemie



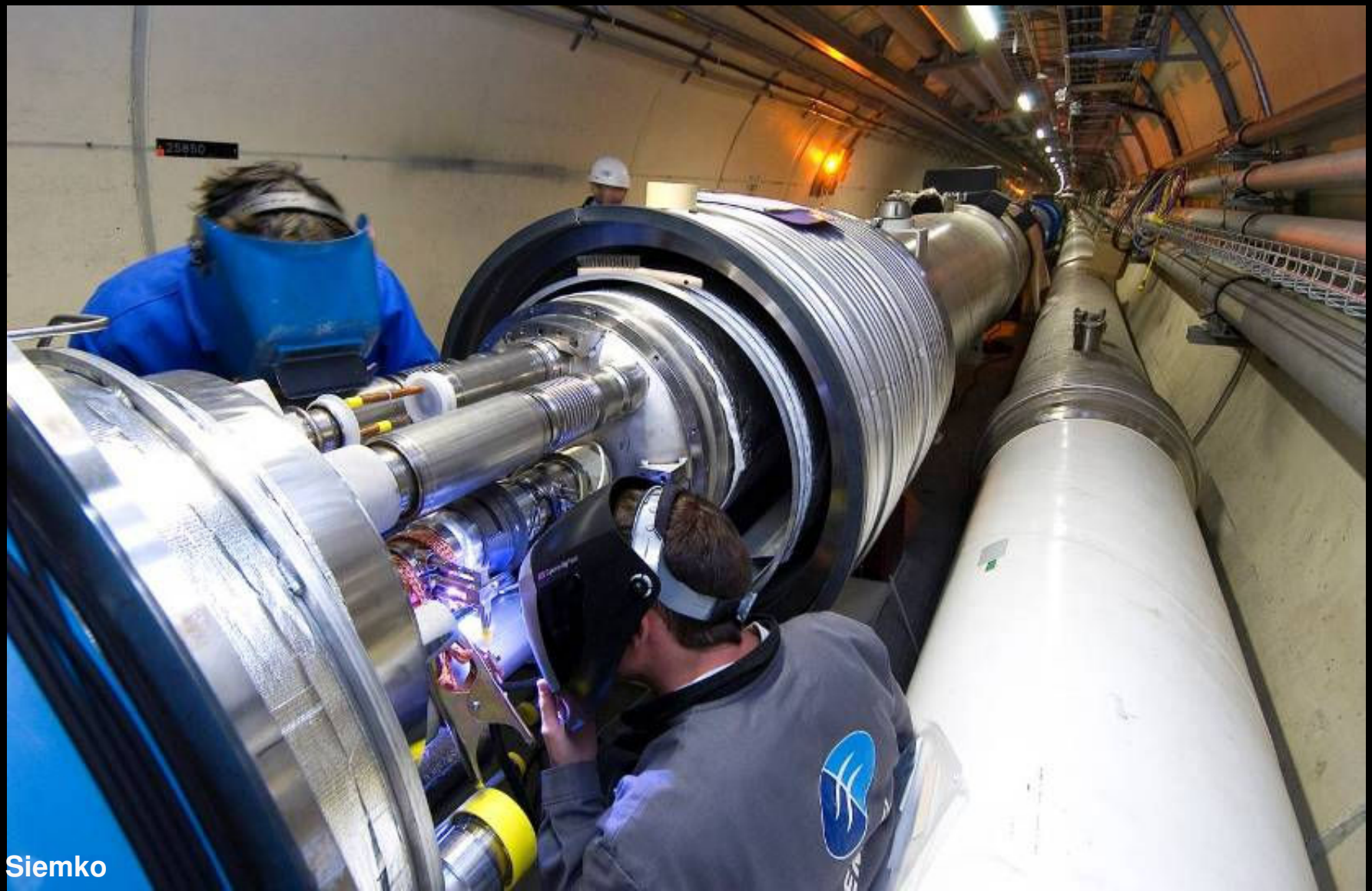
…i podroż w tunelu

30’000 km z prędkością 2 km/h!

Waga urządzeń w tunelu:

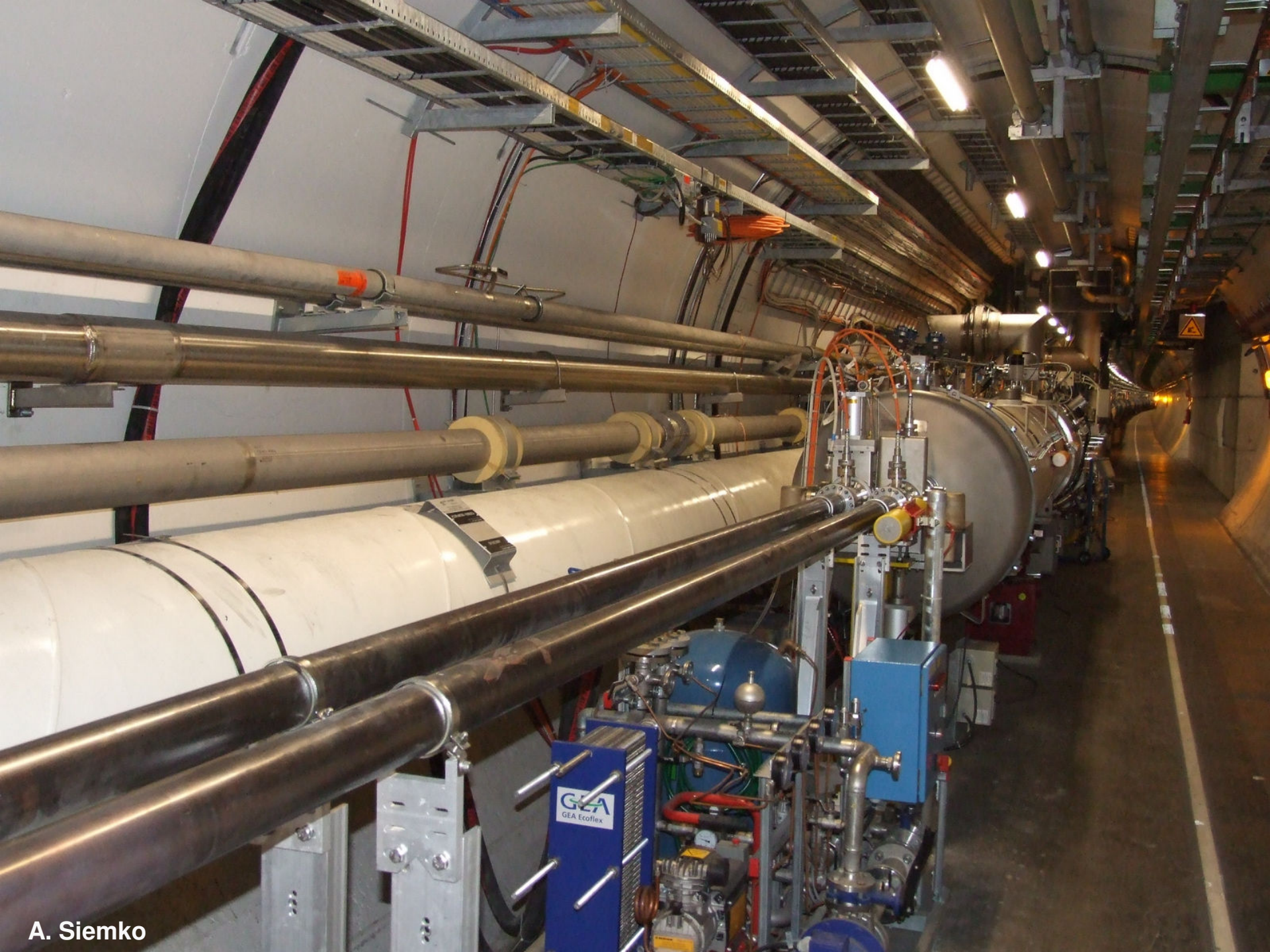
50 000 t

Instalacja – setki tysięcy połączeń

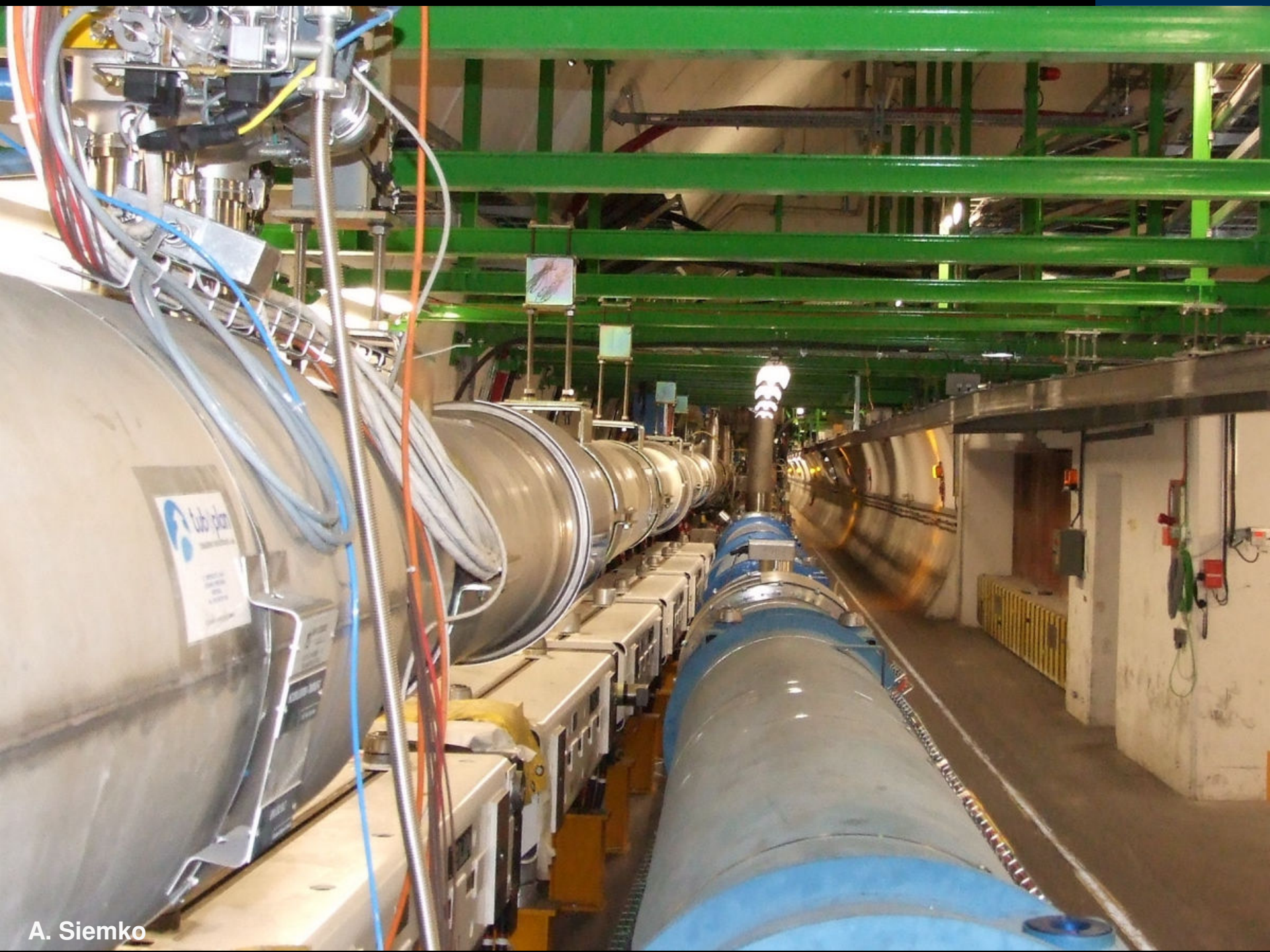


A. Siemko

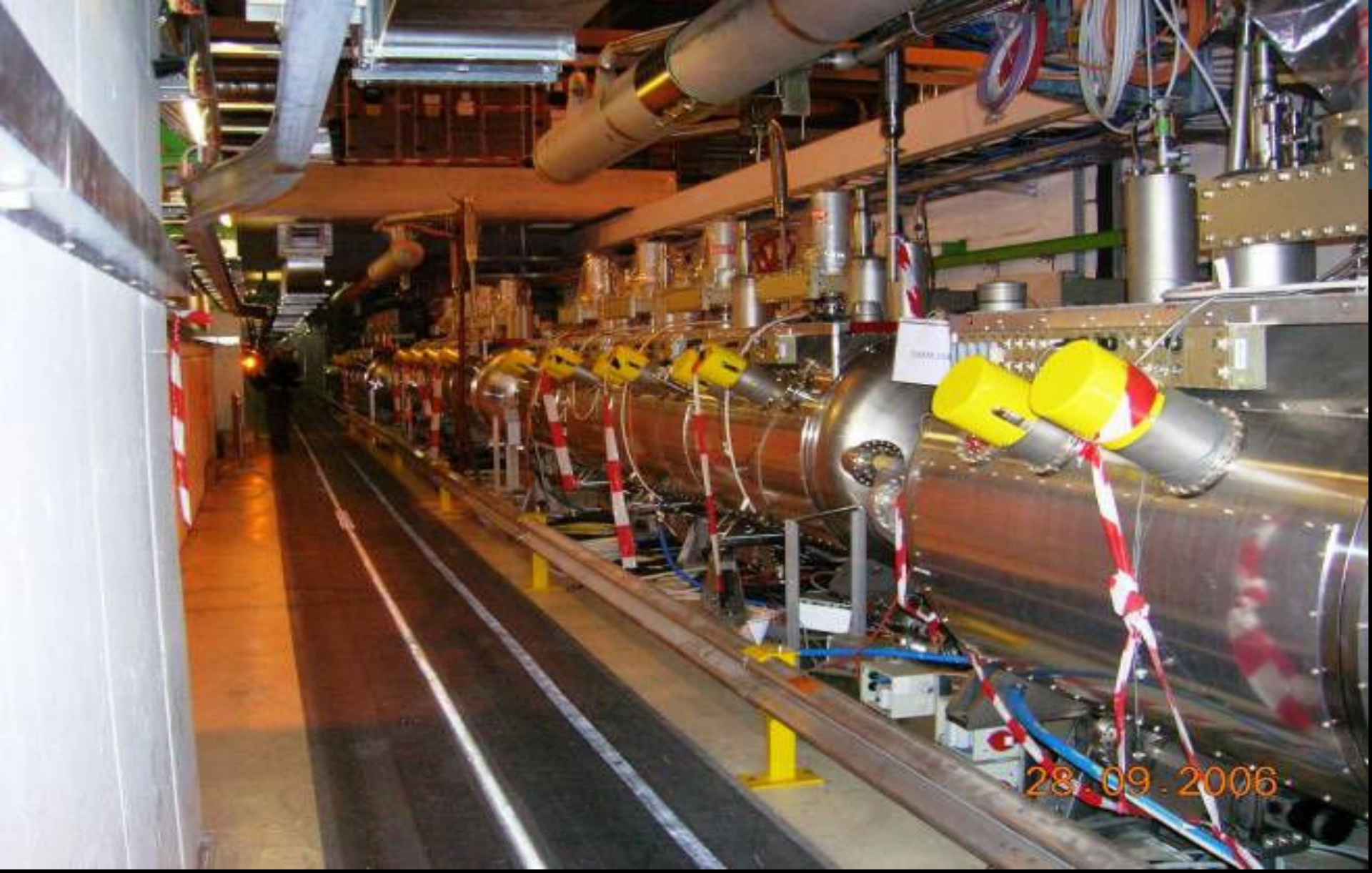
Magnesy nadprzewodnikowe w tunelu LHC

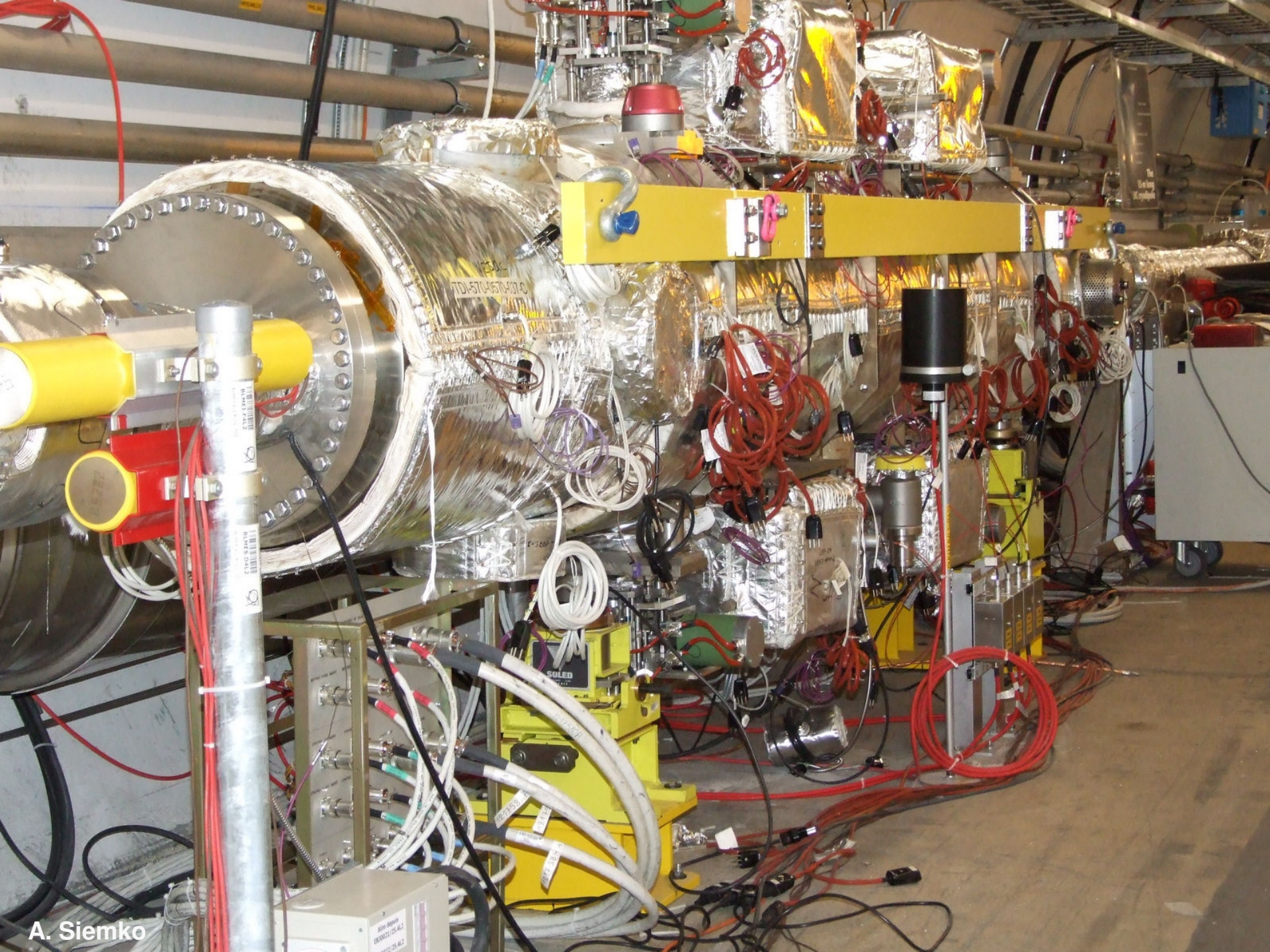


A. Siemko

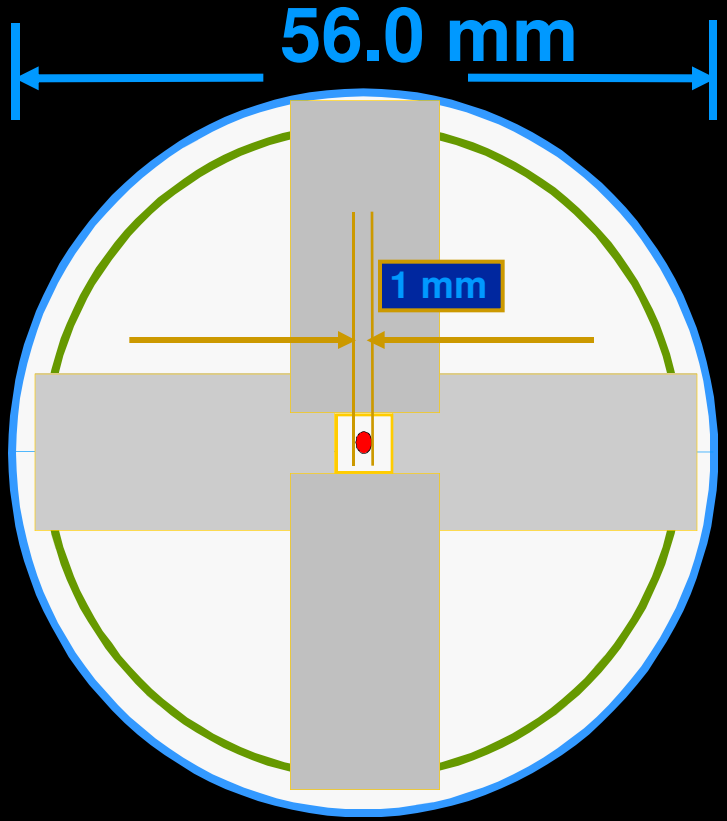


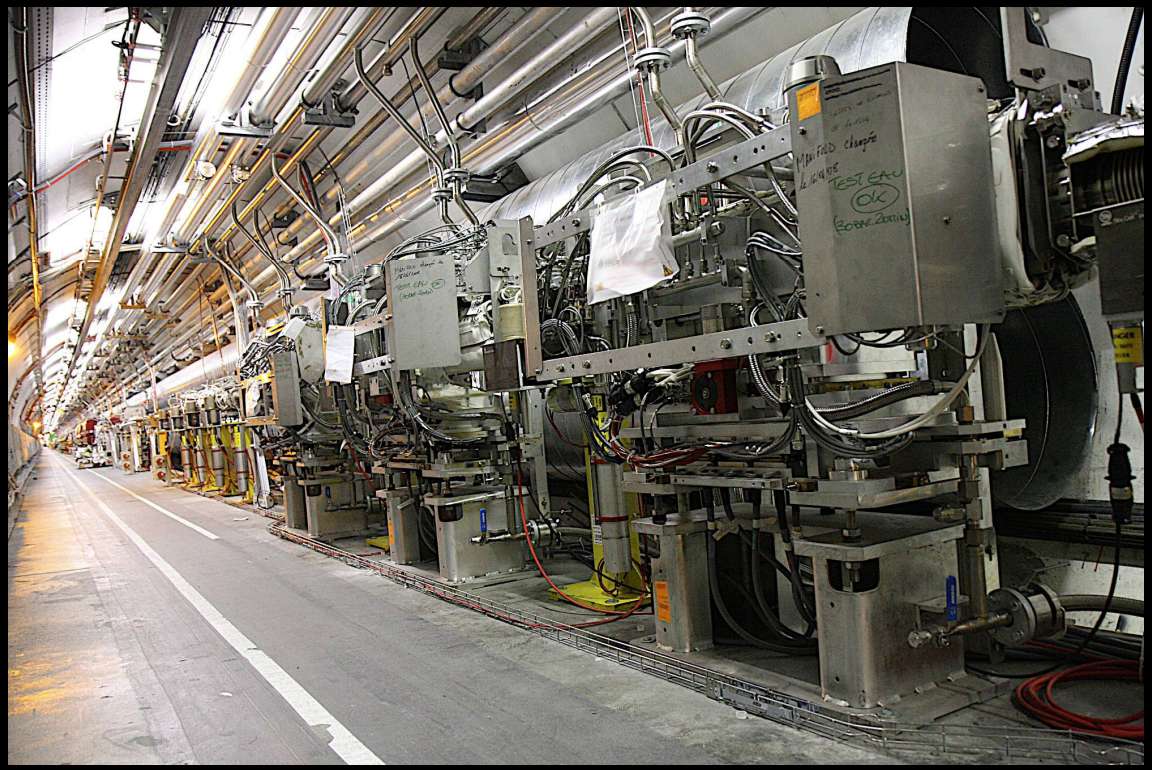
A. Siemko

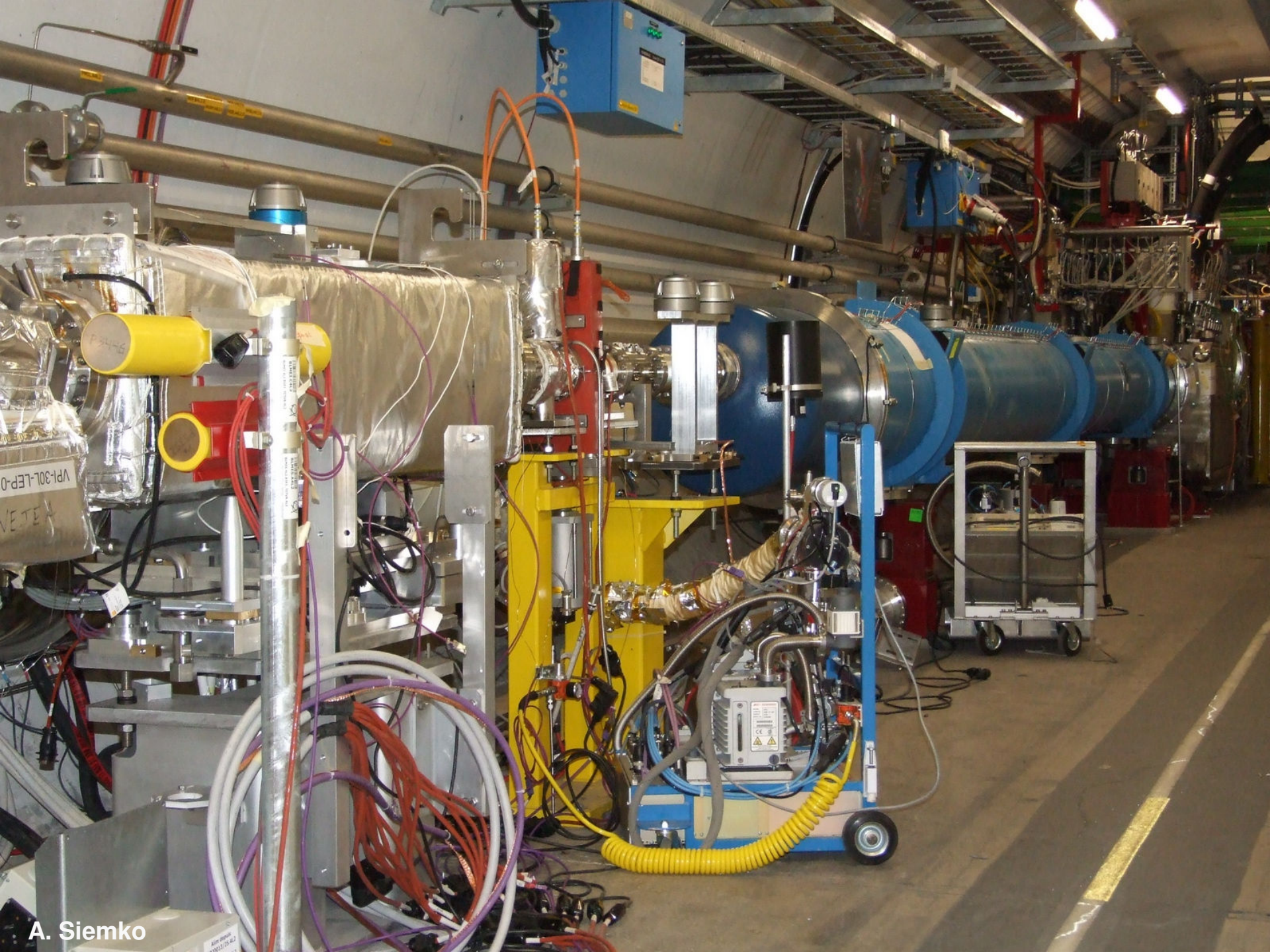

28.09.2006


A. Siemko

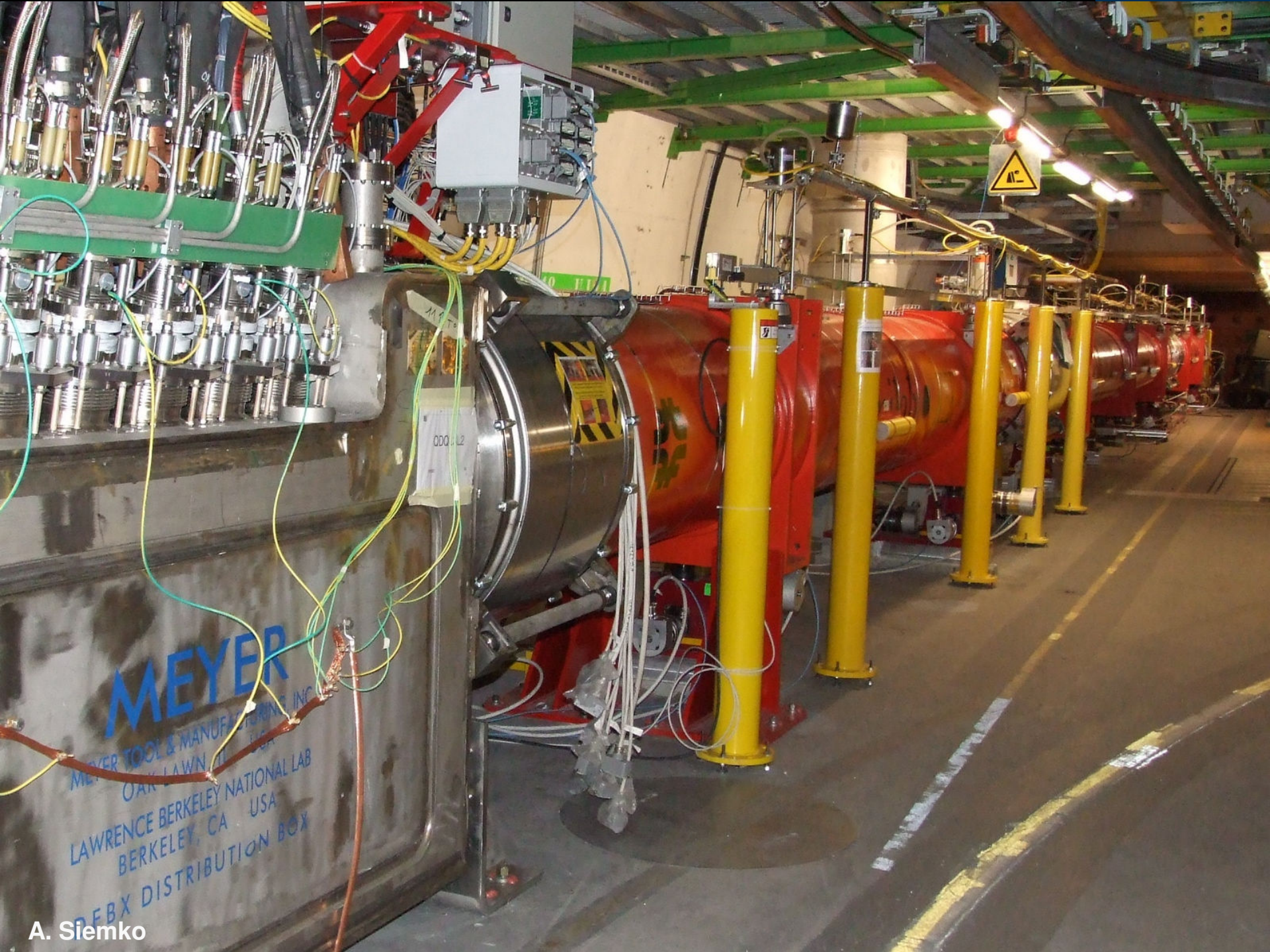
Kolimacja wiązek protonów LHC







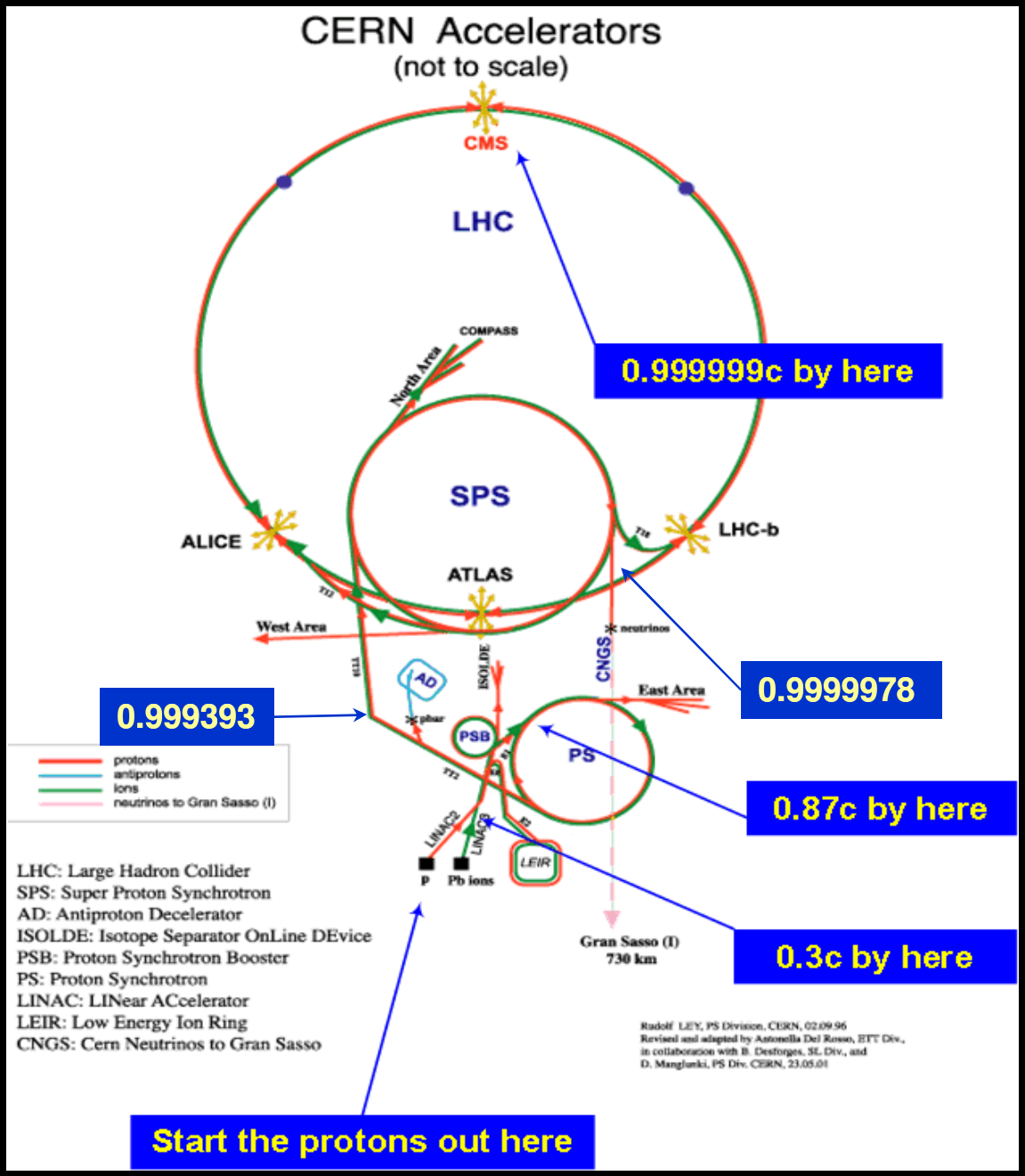
A. Siemko


MEYER
LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LAB
BERKELEY, CA USA
DEBX DISTRIBUTION BOX

A. Siemko

Parametry wiązek protonów LHC

Częstotliwość obiegu wiązki	11.245 kHz
Liczba paczek w wiązce	2808
Liczba protonów w paczce	1.15×10^{11}
Średnica paczki w punkcie zderzeń	16μm
Długość paczki	7.55 cm
Odstęp miedzy paczkami	~7 m
Energia wiązki	2 * 360 MJ
Prąd wiązki	0.54 A


CERN Accelerators
(not to scale)
CMS
LHC
COMPASS
North Area
SPS
ALICE
ATLAS
LHC-b
West Area
CNGS
neutrinos
East Area
AD
ISOLDE
PSB
PS
protons
antiprotons
ions
neutrinos to Gran Sasso (I)
LINAC2
LINAC3
LEIR
p
Pb ions
Gran Sasso (I)
730 km
LHC: Large Hadron Collider
SPS: Super Proton Synchrotron
AD: Antiproton Decelerator
ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
PSB: Proton Synchrotron Booster
PS: Proton Synchrotron
LINAC: LINear ACcelerator
LEIR: Low Energy Ion Ring
CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso
Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
D. Manglunki, PS Div. CERN, 23.05.01
0.999999c by here
0.9999978
0.999393
0.87c by here
0.3c by here
Start the protons out here

Energia wiazek LHC

Momentum at collision	7 TeV (1 eV = 1,6 × 10^{-19} Joule)
Number of bunches	2808
Protons per bunch	$1.15 \cdot 10^{11}$
Total number of protons	$6.5 \cdot 10^{14}$ (1 ng of H^+)

Energia zmagazynowana w 2 wiązkach: 724 MJoule

Energia potrzebna do stopienia 1 tony Cu: 700 MJoule

700 MJ może stopić 1 tonę miedzi

700 MJ zdysypowane w czasie 88 μs

$700.10^6 / 88.10^{-6} \cong 8$ TW

Moc wszystkich elektrowni na świecie $\cong 3.8$ TW

Protekcja urządzeń nadprzewodnikowych

- ca. 1700 Elektrycznych obwodów magnesów nadprzewodnikowych
- ~20000 kanałów zabezpieczających urządzenia nadprzewodnikowe
- 4000 monitorów strat wiązki

Chłodzenie nadpłynym helem

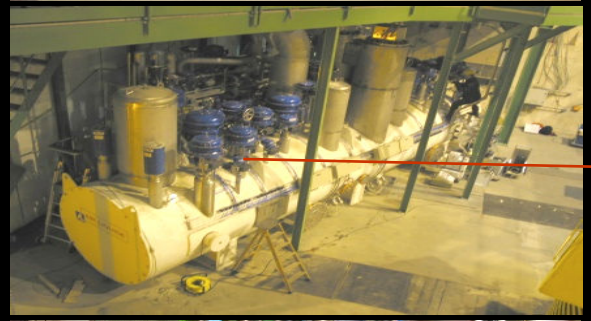
- Zwykły hel gazowy to atomy izotopu ^4He. Przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym ^4He skrapla się w T = 4.22 K. Przy obniżeniu ciśnienia do 50 mbar T < 2.17K (T_λ = 2.17 K punkt λ) zachodzi dramatyczna zmiana jego właściwości

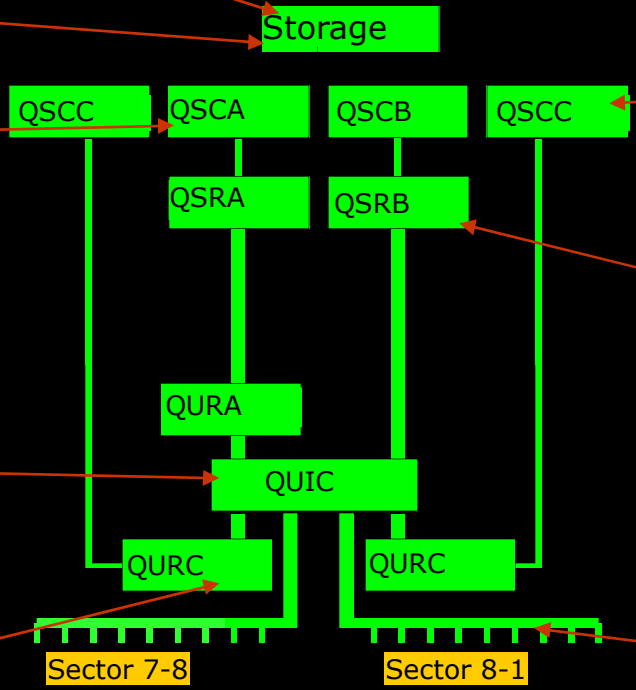
0 ---------- 2.17 K ---------- 5.2 K ----------→ T

He II | I | He I | I | He

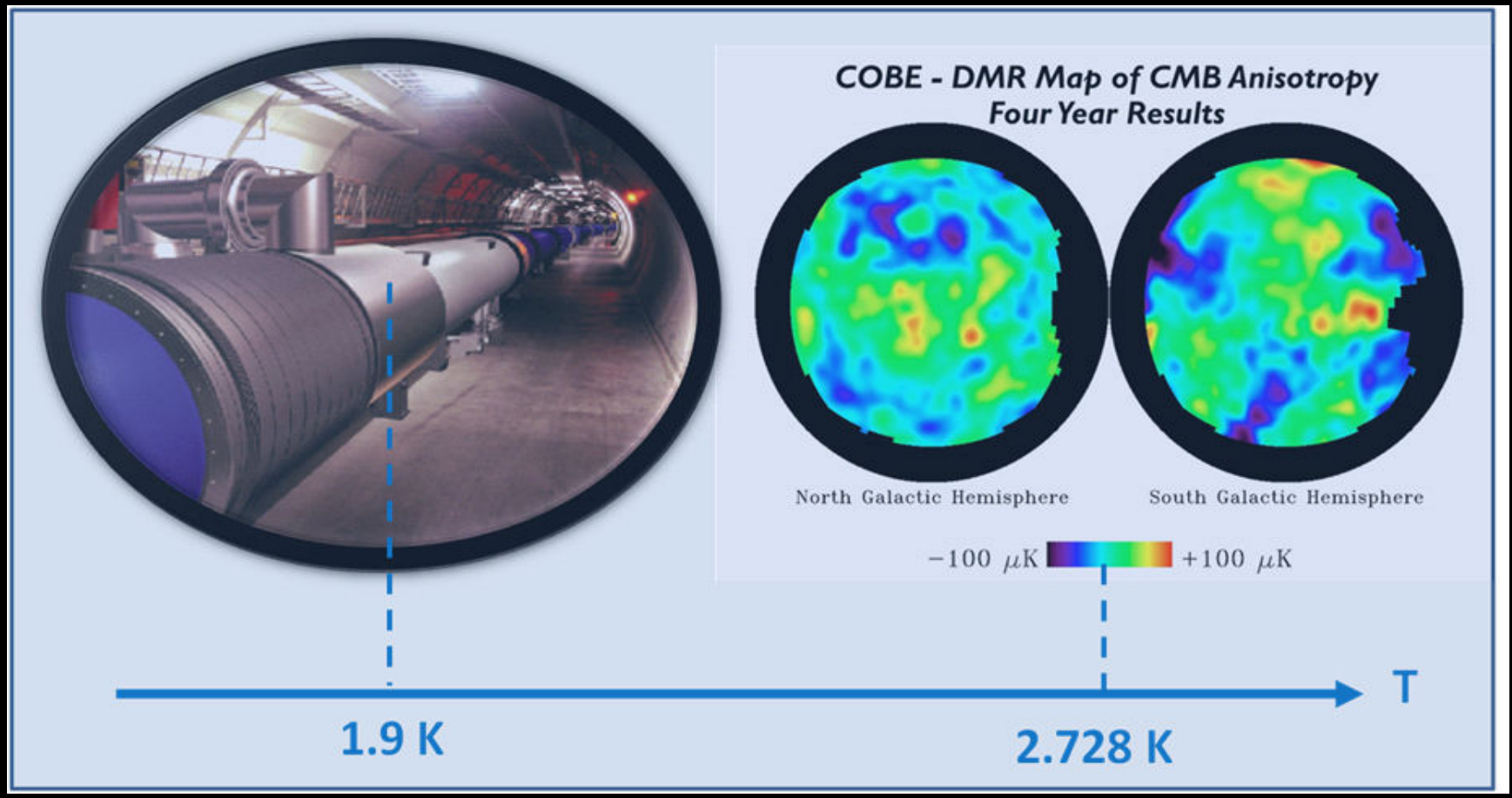
- **Najbardziej niezwykłą zdolnością nadpłynnego helu jest to, ze ciepło może w nim płynąć bez występowania gradientu temperatury**
- **Nadpłynność jest zjawiskiem "nadprzewodnictwa" ciepła**

Kriogenika LHC



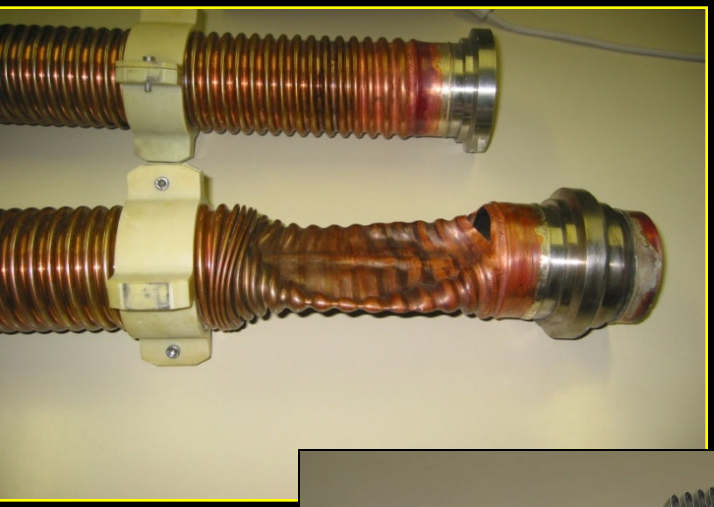


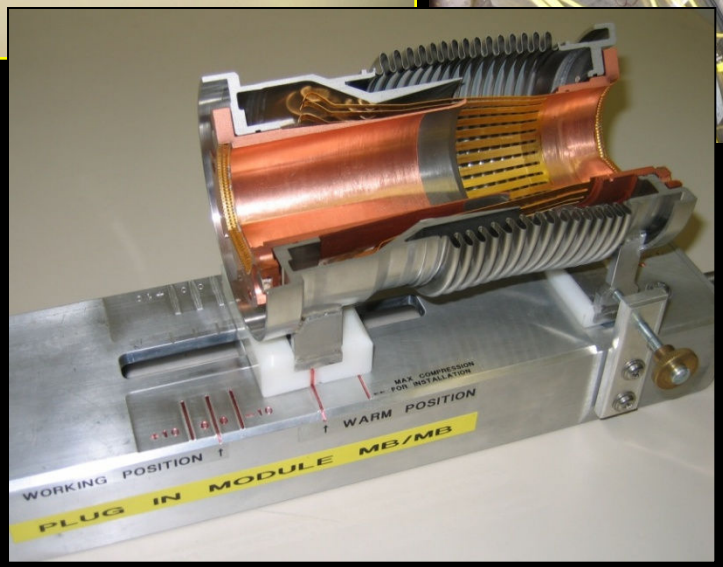
LHC - najzimniejsza cześć wszechświata



Uruchamianie LHC 10/09/2008

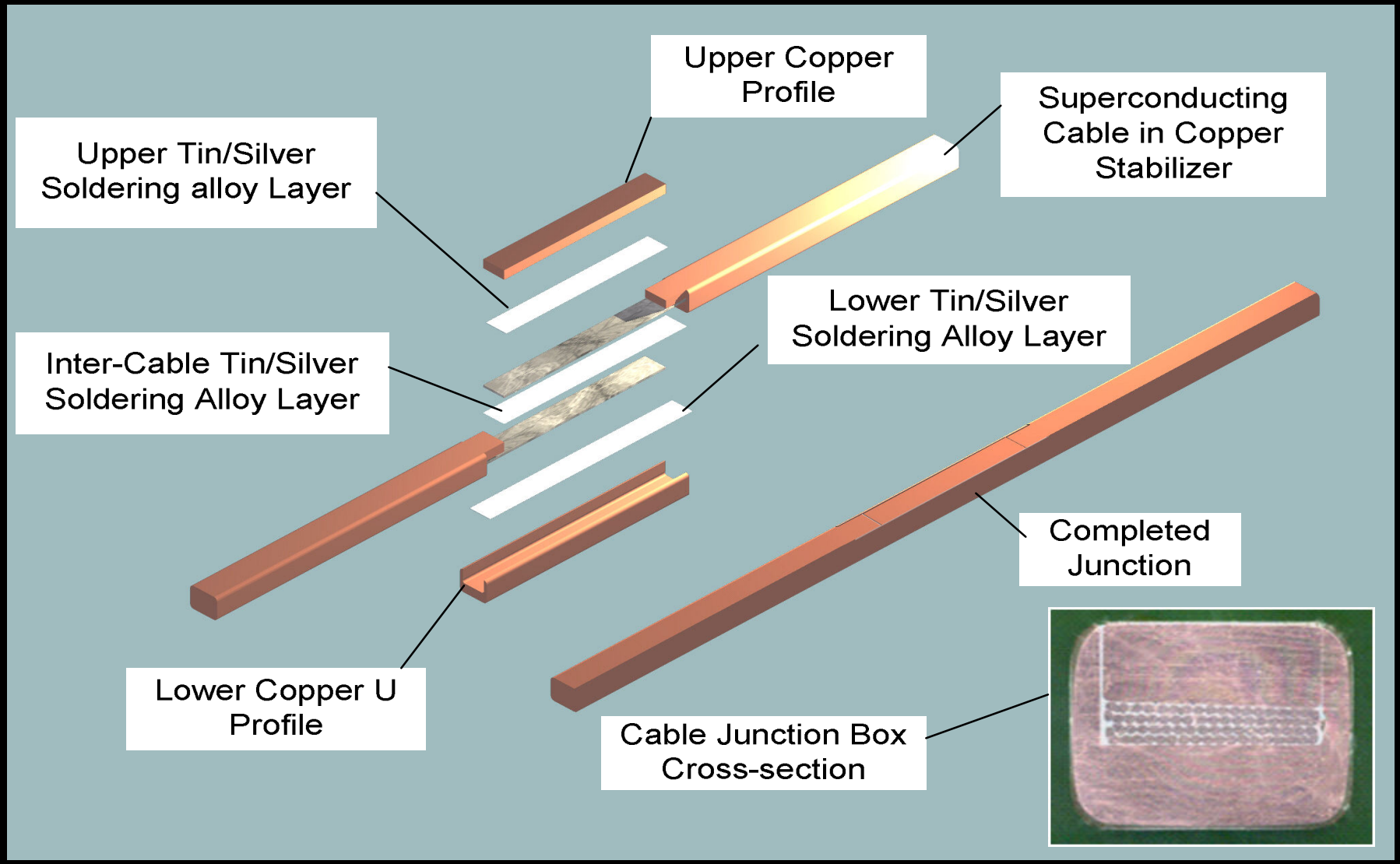
Czy zawsze wszystko jest tak jak tego chcielibyśmy? Not really....



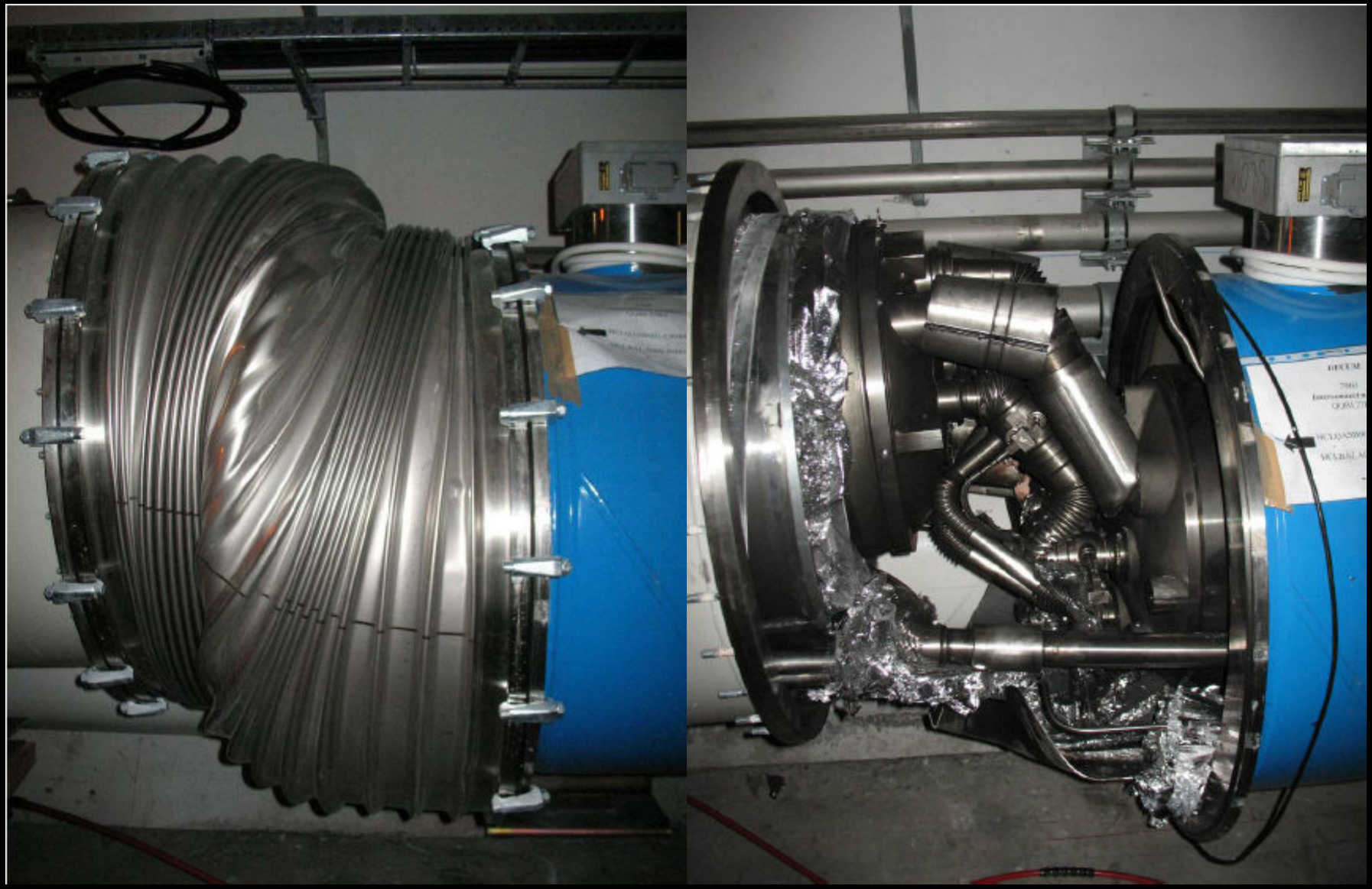


19/09 2008
...poważna awaria

Wystarczyło, ze wśród 10000 połączeń 13kA jedno było wadliwe



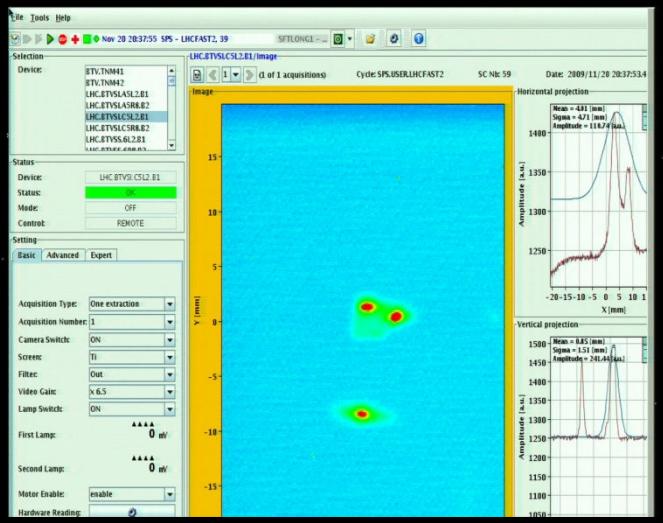
Co potrafi zrobić duże ciśnienie!!!

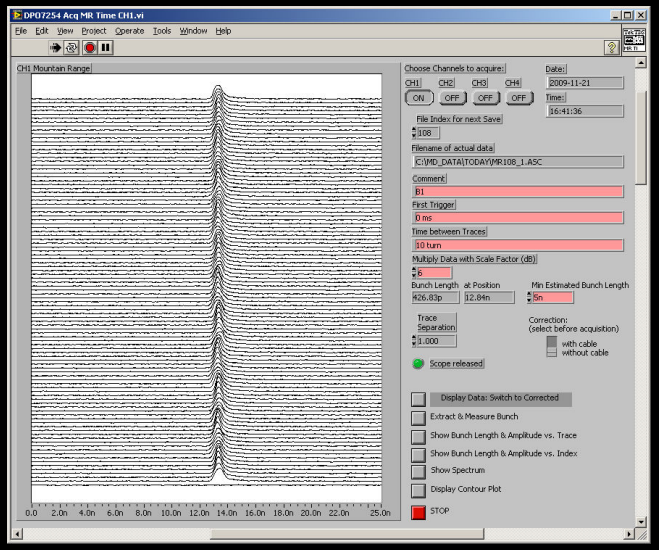


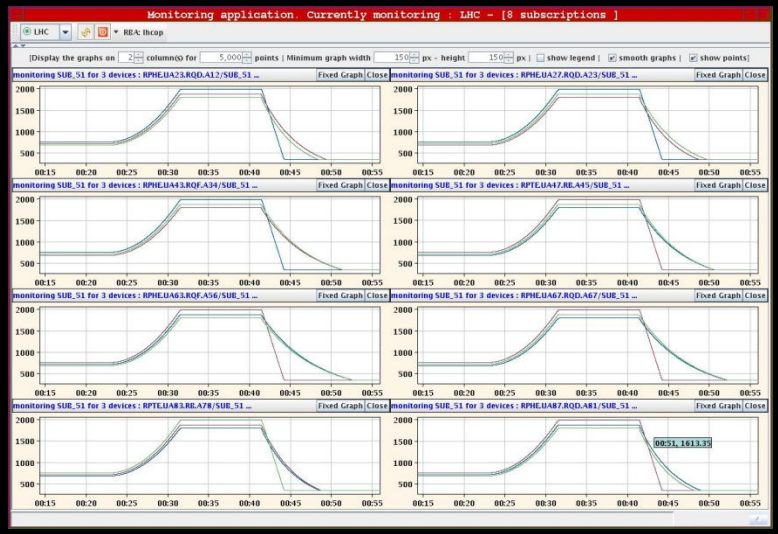
Czy zawsze wszystko jest tak jak tego chcielibyśmy?

- W projekcie takim jak LHC, przy jego bezprecedensowej
  - skali
  - złożoności
  - unikatowości
  - technologicznym nowatorstwie
- Problemy techniczne musza wystąpić
- Ważne jest by te problemy zidentyfikować, zrozumieć i rozwiązać
- Przyczyny ostatniej awarii zostały wyjaśnione i zakończył sie proces naprawy

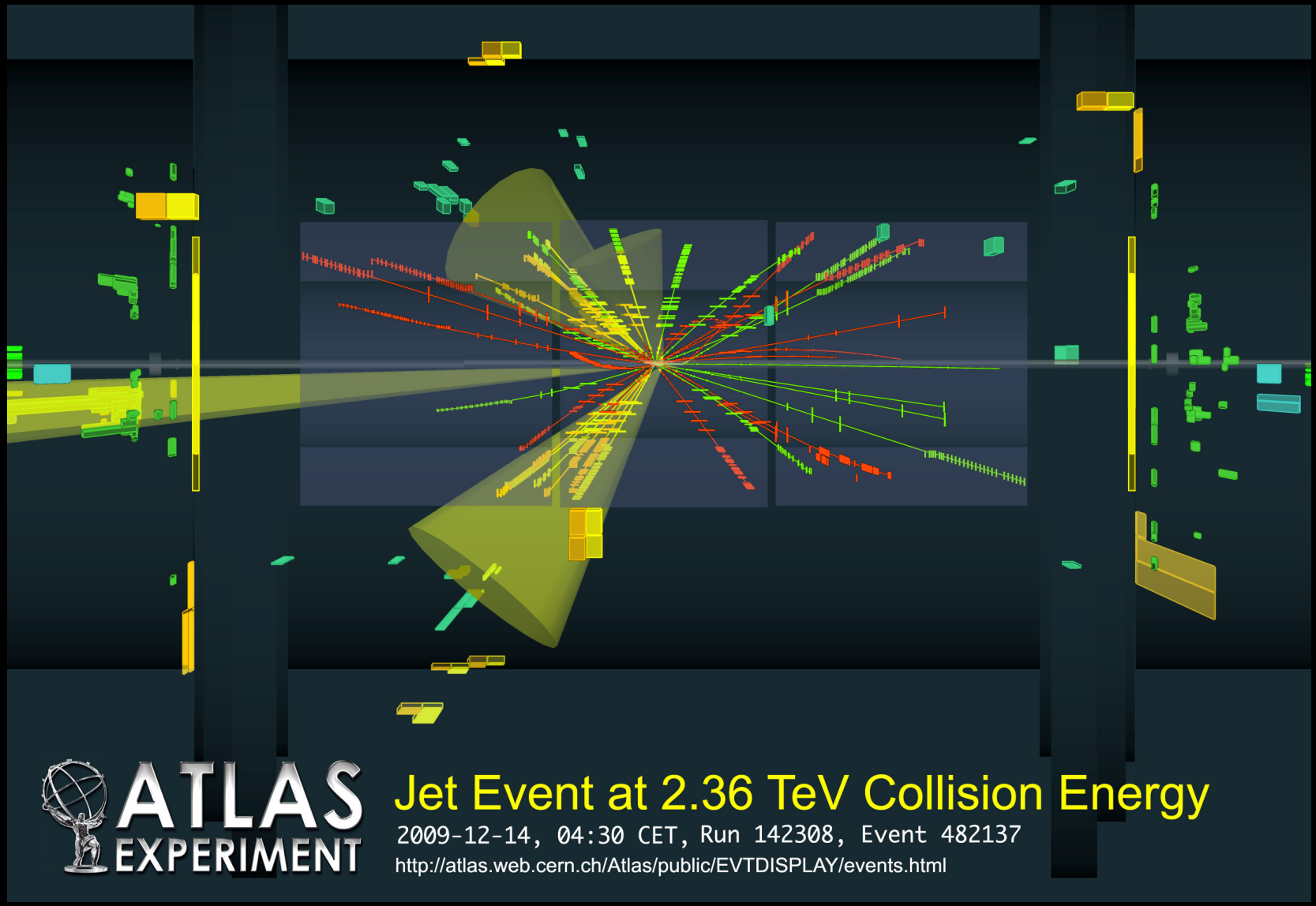
Ponowne uruchamianie LHC 20-23/11/2009



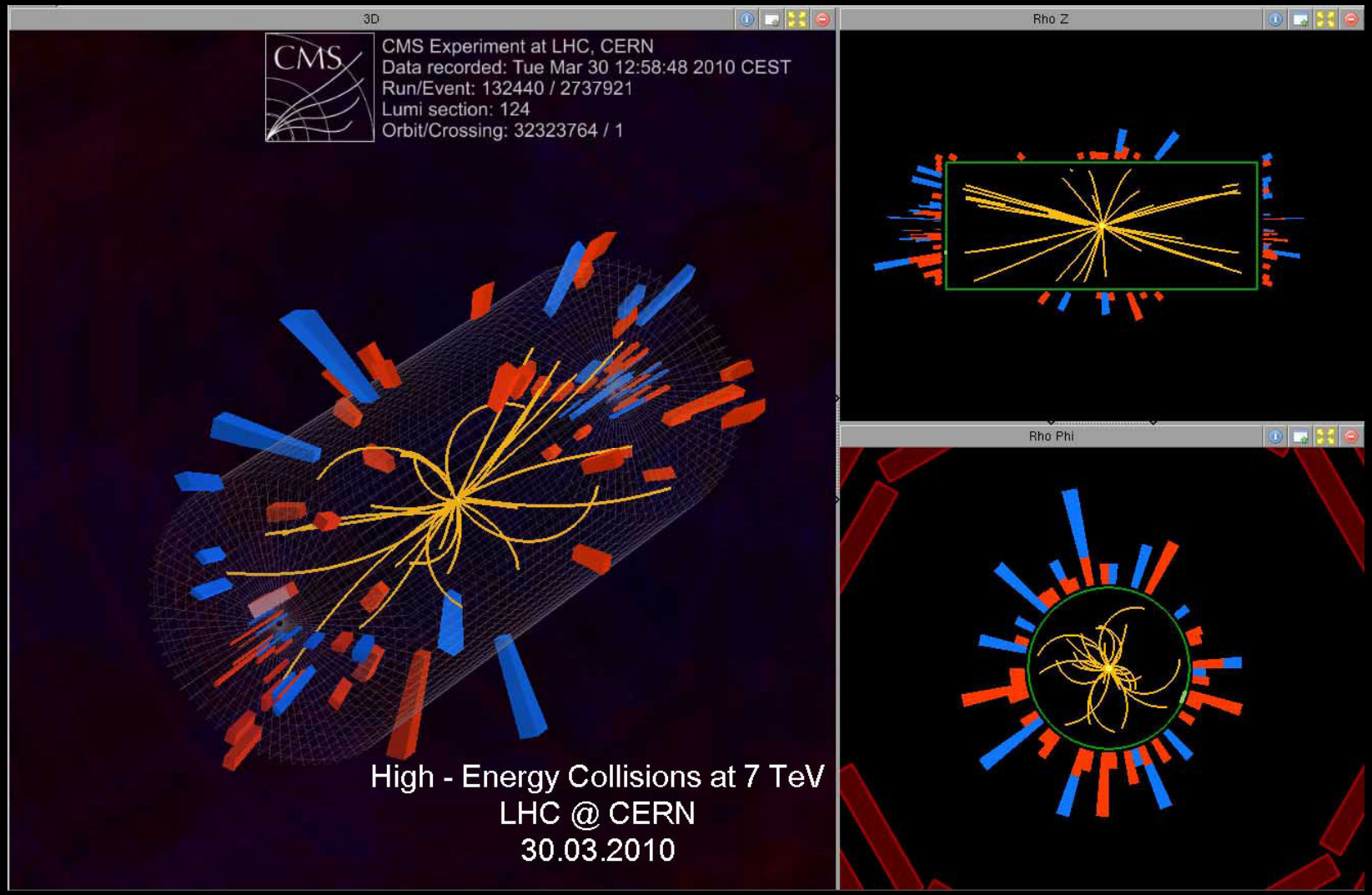




Pierwsze zderzenia w LHC 2*450GeV i 2*1.18 TeV 12/2009



Pierwsze zderzenia w LHC
2*3.5 TeV 30/3/2010

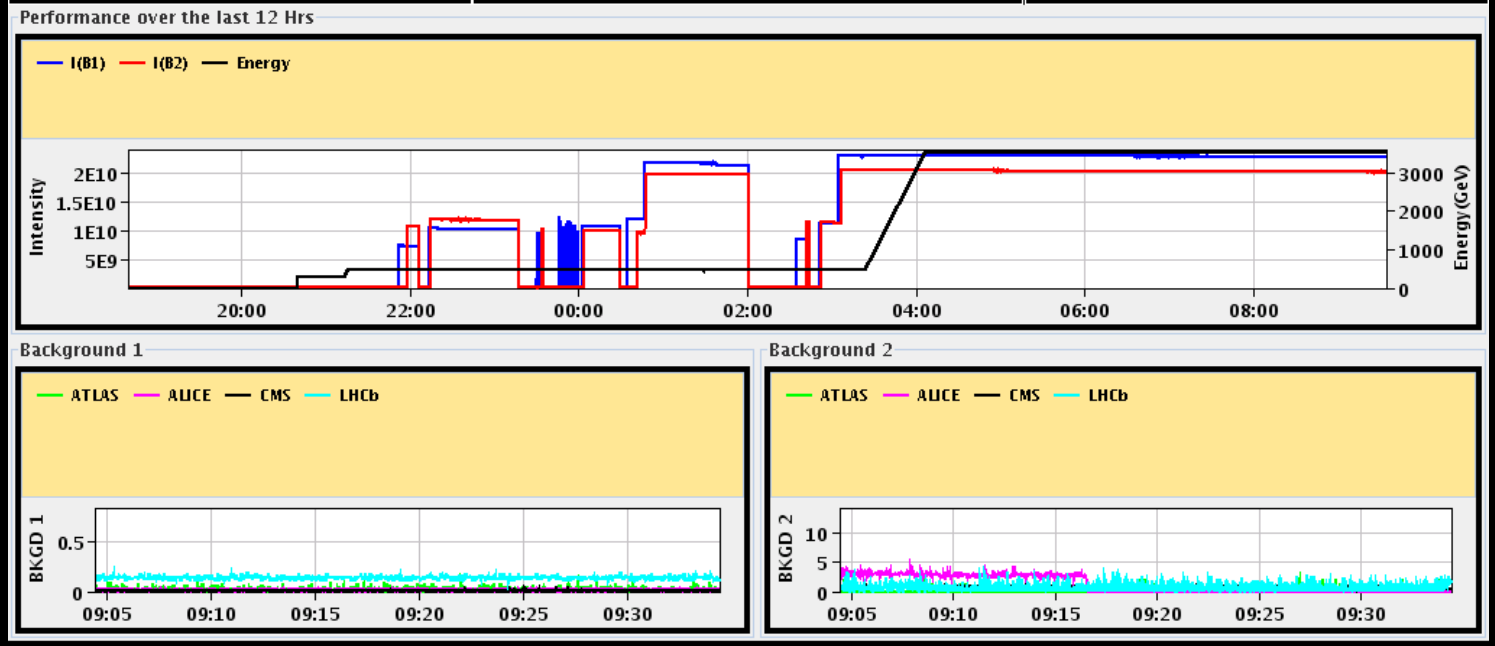


Co robimy dzisiaj?

13-Apr-2010 09:34:24 Fill #: 1035 Energy: 3500.3 GeV I(B1): 2.30e+10 I(B2): 2.02e+10

	ATLAS	ALICE	CMS	LHCb
Experiment Status	STANDBY	STANDBY	STANDBY	STANDBY
Instantaneous Luminosity	1.350e-03	0.000e+00	1.017e-03	2.441e-04
BRAN Count Rate	2.626e+01	1.073e+01	2.129e+01	4.377e+00
BKGD 1	0.026	0.015	0.002	0.113
BKGD 2	0.000	0.000	0.412	1.628
BKGD 3	0.000	0.006	0.003	0.041

LHCf STANDBY Count(Hz): 0.000 | LHCb VELO Position OUT Gap: 58.0 mm | TOTEM: CALIBRATION



Podsumowanie

- LHC jest najwiekszym i najbardziej zlożonym urzadzeniem badawczym jakie kiedykolwiek zostalo wymyslone i skonstruowane
- Po awarii w 2008 LHC zostało naprawione i ponownie uruchomione do energii 2*3.5 TeV
- Akcelerator i detektory funkcjonują poprawnie
- Osiągniecie docelowej energii 2*7 TeV będzie wymagało dodatkowej naprawy (korekcji) połączeń miedzy magnesami (2012 rok)
- Rozwój wysokich technologii, wymaganych w większości badan fizycznych, umożliwia odkrywanie i zrozumienie nowych zjawisk, co w efekcie prowadzi do dalszego rozwoju, coraz to nowszych technologii
- Wiele z opracowanych nowych technologii znajdzie późniejsze zastosowania zarówno w przemyśle, jak i w życiu codziennym
- Należy pamiętać, że badania naukowe w dzisiejszych laboratoriach fizycznych to technika jutra

Dziękuję za uwagę

A ja najbardziej lubię akcelerator van de Graaffa…